



Les glaces de mer en Mer Baltique. Étude géographique et implications environnementales et sociétales à partir de l'étude comparée de la Baie de Botnie (Oulu, Finlande) et du Golfe de Riga (Lettonie)

Elise Lépy

► To cite this version:

Elise Lépy. Les glaces de mer en Mer Baltique. Étude géographique et implications environnementales et sociétales à partir de l'étude comparée de la Baie de Botnie (Oulu, Finlande) et du Golfe de Riga (Lettonie). Géographie. Université de Caen, 2009. Français. NNT : . tel-00444566

HAL Id: tel-00444566

<https://theses.hal.science/tel-00444566>

Submitted on 6 Jan 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ de CAEN / BASSE - NORMANDIE



Université de Caen
Basse-Normandie

U.F.R de GÉOGRAPHIE

École doctorale ED68 – Littératures, cultures et sciences sociales



THÈSE

présentée par

Élise Lépy

et soutenue publiquement le 26 novembre 2009

en vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE CAEN / BASSE - NORMANDIE
Spécialité : Géographie physique, humaine, économique et régionale

Arrêté du 7 août 2006

Les glaces de mer en Mer Baltique
Étude géographique et implications environnementales et sociétales
à partir de l'étude comparée de la Baie de Botnie (Oulu, Finlande)
et du Golfe de Riga (Lettonie)

Membres du Jury

M. Armel COUDÉ, Professeur émérite, Université de Caen / Basse - Normandie (directeur de thèse)
M. Jacques GUILLAUME, Professeur, Université de Nantes (rapporteur)
M. Yannick LAGEAT, Professeur, Université de Bretagne Occidentale (rapporteur)
M. Stéphane COSTA, Professeur, Université de Caen / Basse - Normandie (examineur)
M. Jarmo RUSANEN, Professeur, Université d'Oulu, Finlande (examineur)
M. Pierre THOREZ, Professeur, Université du Havre (examineur)

UNIVERSITÉ de CAEN / BASSE - NORMANDIE



Université de Caen
Basse-Normandie

U.F.R de GÉOGRAPHIE

École doctorale ED68 – Littératures, cultures et sciences sociales



THÈSE

présentée par

Élise Lépy

et soutenue publiquement le 26 novembre 2009

en vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE CAEN / BASSE - NORMANDIE
Spécialité : Géographie physique, humaine, économique et régionale

Arrêté du 7 août 2006

Les glaces de mer en Mer Baltique
Étude géographique et implications environnementales et sociétales
à partir de l'étude comparée de la Baie de Botnie (Oulu, Finlande)
et du Golfe de Riga (Lettonie)

Membres du Jury

M. Armel COUDÉ, Professeur émérite, Université de Caen / Basse - Normandie (directeur de thèse)
M. Jacques GUILLAUME, Professeur, Université de Nantes (rapporteur)
M. Yannick LAGEAT, Professeur, Université de Bretagne Occidentale (rapporteur)
M. Stéphane COSTA, Professeur, Université de Caen / Basse - Normandie (examineur)
M. Jarmo RUSANEN, Professeur, Université d'Oulu, Finlande (examineur)
M. Pierre THOREZ, Professeur, Université du Havre (examineur)

Photographie de la couverture
Les glaces de mer à Nallikari, Oulu (Finlande) –
22 février 2009

Cover picture
Sea ice in Nallikari, Oulu (Finland) –
February 22nd, 2009

Remerciements

La prise en considération des phénomènes glaciels n'a pas été pour moi, en commençant cette thèse sur les glaces de mer en Mer Baltique, une totale nouveauté. En effet, dès ma Maîtrise de Géographie en 2002, ma curiosité avait été retenue, une première fois déjà, sur les côtes du Saguenay – Lac Saint-Jean (48°N au Québec) par le comportement des glaces lacustres et fluviales dans leur relation avec la rudesse hivernale du milieu. Mais, c'est surtout sur les bords de la Mer Baltique, près d'Oulu en Baie de Botnie en Finlande et de Riga en Lettonie, que me sont vraiment apparus, dans leur complexité et leur richesse géographiques, les caractères vraiment particuliers des milieux froids de hautes latitudes et ils ont été pour moi l'expérience nouvelle d'une merveilleuse découverte : celle, fondamentale et préalable, de l'immensité blanche de la banquise marine, des longues nuits froides de l'hiver et des longs jours lumineux de l'été, et celle des sociétés et des cultures fenno-scandinaves et lettones évoluant au contact de tels milieux. Mais, bien entendu, l'analyse de cette complexité et cette richesse géographiques n'auront pu s'exprimer ici sans de nombreux appuis et de nombreuses rencontres, auxquels je dois beaucoup et que je souhaite ici évoquer par des remerciements très sincères.

Cette aventure nordique n'aurait pas pu avoir lieu sans le soutien de mon directeur de thèse, M. **Armel Coudé**, Professeur Émérite de l'Université de Caen – Basse-Normandie, qui, dès le projet de D.E.A., m'a fait totalement confiance. Je le remercie pour l'intérêt qu'il a porté à mes travaux, pour ses conseils avisés durant toutes ces années, pour les réponses à mes sollicitations quand j'étais à l'étranger et enfin pour les nombreuses relectures de ce manuscrit. Je tiens à lui exprimer ma profonde reconnaissance.

Je remercie aussi d'avoir accepté de rapporter sur cette thèse :

- M. **Jacques Guillaume**, Professeur et spécialiste de géographie maritimiste à l'Université de Nantes,
- et M. **Yannick Lageat**, Professeur de Géographie à l'Université de Bretagne Occidentale, membre de l'Institut Universitaire Européen de la Mer et spécialiste de la géographie physique de la mer et du littoral.

Je tiens également à remercier pour leur participation au jury de thèse :

- M. **Stéphane Costa**, Professeur de Géographie à l'Université de Caen – Basse-Normandie, directeur de l'UFR de Géographie, spécialiste des milieux littoraux et marins, et dont j'ai bénéficié des enseignements plusieurs années comme étudiante,
- M. **Jarmo Rusanen**, Professeur de Géographie et directeur du Département de Géographie à l'Université d'Oulu (Finlande) pour m'avoir, à de nombreuses reprises, accueillie dans sa structure d'enseignement et de recherche pendant de longs séjours où il a suivi et souvent conseillé mon travail,
- et M. **Pierre Thorez**, Professeur de Géographie à l'Université du Havre et spécialiste des transports maritimes, de la Russie et des pays de l'Europe Orientale avec qui j'ai eu l'opportunité d'enseigner deux années durant, en tant qu'Attachée Temporaire d'Enseignement et de Recherche, pendant lesquelles j'ai bénéficié de son appui pédagogique et de ses encouragements avisés pour ma recherche.

Cette recherche a été menée dans divers cadres institutionnels et universitaires et j'aimerais témoigner de ma gratitude aux responsables de ces structures pour la qualité de leur accueil, de leur soutien et des locaux et des moyens mis à ma disposition. Je remercie vivement :

- le laboratoire GEOPHEN – *GÉOgraphie PHysique et ENvironnement* – UMR LETG 6554 CNRS, de l'Université de Caen – Basse-Normandie, laboratoire d'accueil de cette thèse, tout d'abord en la personne de M. **Daniel Delahaye**, son directeur et Professeur de Géographie, qui m'a soutenue par ses interventions autant au laboratoire et à l'école doctorale « Littératures, cultures et sciences sociales » ; et, bien entendu, l'ensemble de l'équipe, enseignant-chercheurs et personnels, pour m'avoir permis, par la logistique, les moyens scientifiques et l'environnement de la recherche de mener à bien cette thèse qui s'insère dans les thématiques environnementales du GEOPHEN et, plus généralement, dans l'axe « géographie de la mer » de l'UMR LETG. J'adresse des remerciements particuliers à M. **Olivier Cantat**, Maître de conférences de Géographie qui m'avait encadrée lors de mes travaux de maîtrise menés au Québec, pour ses conseils tout au long de la thèse. Je remercie également Mme **Blandine Parey**, secrétaire-gestionnaire du laboratoire, pour sa disponibilité et son écoute. Enfin, il a été agréable de pouvoir partager la vie universitaire de doctorante avec les autres thésards du laboratoire et également ceux du CRESO.

- Toutes les missions de terrain dans le Nord de la Mer Baltique ont pu se faire grâce à l'accueil chaleureux du personnel du département de géographie de l'Université d'Oulu avec lequel des relations interuniversitaires avaient été précédemment mises en place avec l'Université de Caen. Je remercie aussi M. **Benoît Raoulx**, Maître de conférences – HDR à l'Université de Caen – Basse-Normandie, qui m'a orientée vers ses collègues finlandais. Ma sincère reconnaissance va particulièrement à M. **Jarmo Rusanen**, directeur du Département de Géographie d'Oulu qui m'a accueillie dans les locaux dès ma première venue et qui a mis à ma disposition tout le matériel (informatique, photographique, bibliographique et autre) nécessaire à mes recherches. Lors de mes cinq autres séjours, j'ai pu bénéficier des mêmes conditions d'accueil ce qui a grandement facilité mon travail de recherche sur le terrain.

Pendant la première mission de terrain d'une durée de dix mois, j'ai reçu une bourse bilatérale franco-finlandaise Égide – CIMO du Ministère français des Affaires étrangères et européennes.

J'aimerais ensuite remercier les membres du département de géographie d'Oulu – enseignants, chercheurs, doctorants et administratifs – qui m'ont très souvent associée aux divers événements universitaires et autres de l'institut. Je pense en particulier au stage de terrain à Kilpisjärvi, organisé sous la houlette de M. **Olavi Heikkinen**, alors Professeur de Géographie, qui m'a permis de découvrir enfin les formes et processus de géomorphologie glaciaire évoqués dans les cours de mes premières années d'études universitaires. J'ai pu également participer, en tant qu'invitée, à des cours et conférences au sein du département. D'autre part, je pense à ces festivités organisées par le personnel auxquelles j'ai pu prendre part comme le *pikkujoulu*, petit Noël, et aux diverses sorties auxquelles j'ai été conviée et qui m'ont complètement intégrée au sein du département.

Enfin, je tiens à remercier M. **Pekka Hulkkonen**, ADP-planner, que j'ai souvent dérangé pour des problèmes logistiques, notamment informatiques, et qu'il a toujours su résoudre rapidement.

- La mission de terrain à Riga (2006) s'est déroulée dans les locaux de la LEGMA – *Latvian Environment, Geology and Meteorology Agency* – institution gouvernementale du Ministère de l'Environnement dont je remercie le personnel pour son accueil. Je remercie plus particulièrement Mme **Inese Mikelsons**, alors conseillère à la direction du suivi des projets de la LEGMA, pour m'avoir accompagnée dans toutes les démarches de prise de rendez-vous et de collecte de données, et d'avoir accepté de nombreuses fois l'ingrat rôle de traductrice ; et M. **Yuri Shishkin** responsable du département de l'information et du développement auquel le Service des glaces est intégré. Cette mission de trois mois en Lettonie a été financée par la bourse des « Aires Culturelles » du Ministère français des Affaires étrangères et européennes.

De nombreuses autres personnes ont contribué à la collecte des données et au bon avancement de cette thèse. Que soient remerciés ici :

- le Lieutenant de vaisseau M. **Markku Kohonen** de la garde-côtière de Virpiniemi en Finlande pour sa disponibilité à chacune de mes visites à la station des garde-côtes. Il a également souvent facilité et rendu possible certaines rencontres avec les « acteurs » de la banquise.
- M. **Matti Leppäranta**, Professeur en Géophysique à l'Université d'Helsinki, M. **Ari Seinä**, directeur du Service des glaces de Finlande du FIMR – *Finnish Institute of Marine Research* – et M. **Jari Haapala** chercheur au FIMR pour m'avoir permis l'accès à certaines données relatives aux glaces de mer.
- M. **Juha Laatonen**, archiviste au FMI – *Finnish Meteorological Institute* – pour m'avoir permis de consulter les archives relatives aux données météorologiques.
- M. **Lars Axell**, océanographe au SMHI – *Swedish Meteorological and Hydrological Institute* – que j'ai eu l'occasion de rencontrer au 5^{ème} Workshop du BSIC – *Baltic Sea Ice Climate* – à Hambourg, pour m'avoir fourni par la suite de nombreuses informations concernant les conditions glacielles des stations suédoises du Golfe de Botnie.
- M. **Niko Hänninen**, historien à l'Université d'Oulu pour m'avoir menée sur les traces des grands explorateurs des pays nordiques.
- les administrations maritimes d'Oulu et de Riga. Je pense plus particulièrement à Mme **Päivi Vähänikkilä-Kuronen**, directrice administrative du Port d'Oulu que j'ai sollicité tant de fois, et le capitaine M. **Valdis Dreimanis**, inspecteur-chef de la navigation et des ports de Lettonie.
- tous les « acteurs » de la banquise qui m'ont fait partager leurs expériences et m'ont permis de découvrir le monde de la mer en milieu englacé. Je pense bien sûr à M. **Matti Raatikainen**, capitaine du brise-glace *Tuura*, de m'avoir fait vivre l'expérience, fondamentale et inoubliable pour moi, de remorquage d'un navire dans la banquise, et au capitaine M. **Hermanis Cernovs** de la garde-côtière de Lettonie de m'avoir permis de survoler les glaces du Golfe de Riga en hélicoptère. Je remercie également les pêcheurs, chasseurs, marins et toutes les personnes qui ont participé à mon enquête statistique.
- les personnels d'autres administrations (*Finnish Maritime Administration, Finnish Game and Fisheries, Swedish Maritime Administration*) qui ont eu la bonté et surtout la rapidité de répondre à certaines de mes interrogations.
- enfin, les personnels des ressources documentaires. Mes remerciements vont plus particulièrement à Mme **Viviane Zambelli**, responsable de la cartothèque, et M. **Nicolas Blanpain**, responsable de la bibliothèque de géographie de l'Université de Caen – Basse-Normandie, que j'ai sollicité de nombreuses fois de près et de loin quand j'étais dans mes terres nordiques ; ainsi qu'aux membres de la bibliothèque d'Oulu très riche en documents et aux archivistes de la LEGMA.

Durant mes années de doctorat, j'ai pu bénéficier de l'expérience très enrichissante de l'enseignement en tant qu'Attachée Temporaire d'Enseignement et de Recherche de Géographie à l'UFR de Lettres et Sciences Humaines de l'Université du Havre pendant deux années consécutives. J'aimerais ainsi remercier le personnel de l'UFR – enseignant-chercheurs, doctorants et personnels administratifs – pour leur accueil et plus particulièrement M. **Pierre Thorez**, Professeur de Géographie et M. **Olivier Joly**, Maître de conférences en Aménagement avec lesquels j'ai collaboré dans le cadre des enseignements ; et M. **Philippe Vidal**, Maître de conférences de Géographie pour son soutien et ses encouragements.

J'aimerais exprimer des remerciements particulièrement appuyés à **Sinikka et Pekka Poutiainen**, ma famille « d'accueil » finlandaise, qui ont, à leur manière, participé au bon avancement de ce travail. Je leur suis reconnaissante d'avoir eu la gentillesse et la patience de m'avoir tant de fois emmenée sur mes lieux de rendez-vous et de m'avoir hébergée lors de certaines de mes missions de terrain. Leur disponibilité et leur profonde amitié ont largement participé à me faire découvrir la culture finlandaise et son sens de l'hospitalité.

J'adresse également mes remerciements à mes amis, de France, de Finlande et d'ailleurs, pour leur soutien et leurs encouragements. J'adresse une mention particulière à ceux qui ont eu l'amitié de m'accompagner sur la banquise et qui ont pu parfois expérimenter, à leur grande joie, les glaciales températures et les tempêtes de neige soudaines de l'hiver baltique !

Je tiens enfin à exprimer ma reconnaissance envers ma famille qui m'a soutenue tout au long de mes études et dans tous mes choix de déplacement à l'étranger. Merci donc à mes parents et à mes sœurs pour leurs encouragements pendant ces années de thèse.

Enfin, un merci tout particulier à Rodolfo qui a dû me supporter pendant tous ces longs mois de rédaction mais qui, par ses encouragements, a surtout su me faire prendre le recul nécessaire à l'accomplissement de ce travail.

À Lion-sur-Mer, le 3 Octobre 2009

Remerciements
Sommaire

Introduction générale

Partie 1 / L'état de la question

Chapitre 1 / Position de la thèse
Chapitre 2 / Présentation de la zone d'étude
Chapitre 3 / Approche méthodologique

Partie 2 / Les glaces de mer

Chapitre 4 / Les caractéristiques glacielles côtières et marines
Chapitre 5 / La relation des phénomènes glacio-marins avec le climat et la météorologie
Chapitre 6 / L'action des glaces de mer sur la morphologie littorale

Partie 3 / Les implications sociétales

Chapitre 7 / Les populations riveraines face à la banquise hivernale
Chapitre 8 / La navigation hivernale et la banquise
Chapitre 9 / La banquise, un risque sociétal ?

Partie 4 / Tendances et perspectives

Chapitre 10 / Passé et avenir des glaces de mer de la Baltique
Chapitre 11 / Les impacts socio-économiques des variations glacielles

Conclusion générale

Références bibliographiques

Références des séries de données et des sites internet
Glossaire
Annexes
Liste des illustrations
Table des matières

Introduction générale

Parmi les mers les plus septentrionales d'Europe, la Mer Baltique a pour particularité de prendre en glace tous les ans contrairement aux mers européennes de même latitude, telle la Mer de Norvège ou la Mer du Nord. Cette étendue marine, espace géographique de cette recherche, connaît alors saisonnièrement une transformation nette de son paysage gouvernée par l'embâcle et la débâcle glacielles de ses eaux. Les caractéristiques de sa glaciellisation varient d'une saison à une autre : l'extension maximale des glaces marines peut couvrir 10 à 100% de sa surface, la période de prise en glace varie de quatre à sept mois, et leur épaisseur maximale peut atteindre 120 centimètres (Jevrejeva et *al.*, 2004, 217). De plus, les eaux côtières des fonds de ses trois principaux golfes (Botnie, Finlande et Riga) sont les premières à geler chaque année (carte 1). Notre étude de ce phénomène et de ses implications environnementales et sociétales s'appuiera principalement sur l'approche comparée des cas de la Baie de Botnie et du Golfe de Riga (leurs sites, mentionnés dans le texte, sont localisés sur la carte dépliant 37 en dernière page de cet ouvrage).

La Mer Baltique, une mer subpolaire

Cette mer « *insérée dans la masse continentale eurasiatique, est située à l'abri de la chaîne des Scandes et dans un domaine déjà subpolaire puisqu'elle s'étend entre 54° et 66°N. À ces latitudes, les contrastes saisonniers sont très marqués, le bilan radiatif est fortement déficitaire et conduit à la glaciellisation saisonnière de la mer* » (Roussel, 1987). Isabelle Roussel évoque donc l'appartenance de la Mer Baltique au domaine subpolaire. De fait, cette mer s'étend sur plus de 1 400 km Nord-Sud et présente ainsi des caractères appartenant à des milieux naturels climatiquement assez diversifiés. Ainsi le Golfe de Botnie se situe à la même latitude que l'Islande, le Sud du Groënland ou encore l'Alaska alors qu'au Sud, la Mer Baltique est sur le parallèle du Danemark ou des Îles Britanniques. Incluse dans le domaine tempéré froid continental nord-européen (Planchon, 1997, 93), la Baltique « *se rattache au « monde polaire » en hiver, et aux latitudes tempérées en été* » (Pagney, 1989, 167). Cette diversité climatique permet une zonalité biogéographique qui met en évidence le caractère froid des milieux continentaux septentrionaux bordiers de l'espace marin baltique. Ainsi, le Nord, circumpolaire, est caractérisé par une végétation de toundra voire de barrens à lichens puis par une végétation plus arbustive au sud qui passe *via* l'écotone forêt-toundra à la taïga ou forêt de conifères.

Pourtant, du fait de son caractère glacial, la mer Baltique peut être comptée parmi les mers arctiques et subarctiques de l'hémisphère Nord comme celles du Nord de la Sibérie (Mer de Kara, Mer de Laptev), du Nord du Canada (Baie de Baffin, Baie d'Hudson, Mer du Labrador), la Mer de Beaufort, la Mer du Groënland, ou encore la Mer d'Okhotsk qui prennent en glace tous les hivers (carte 1).

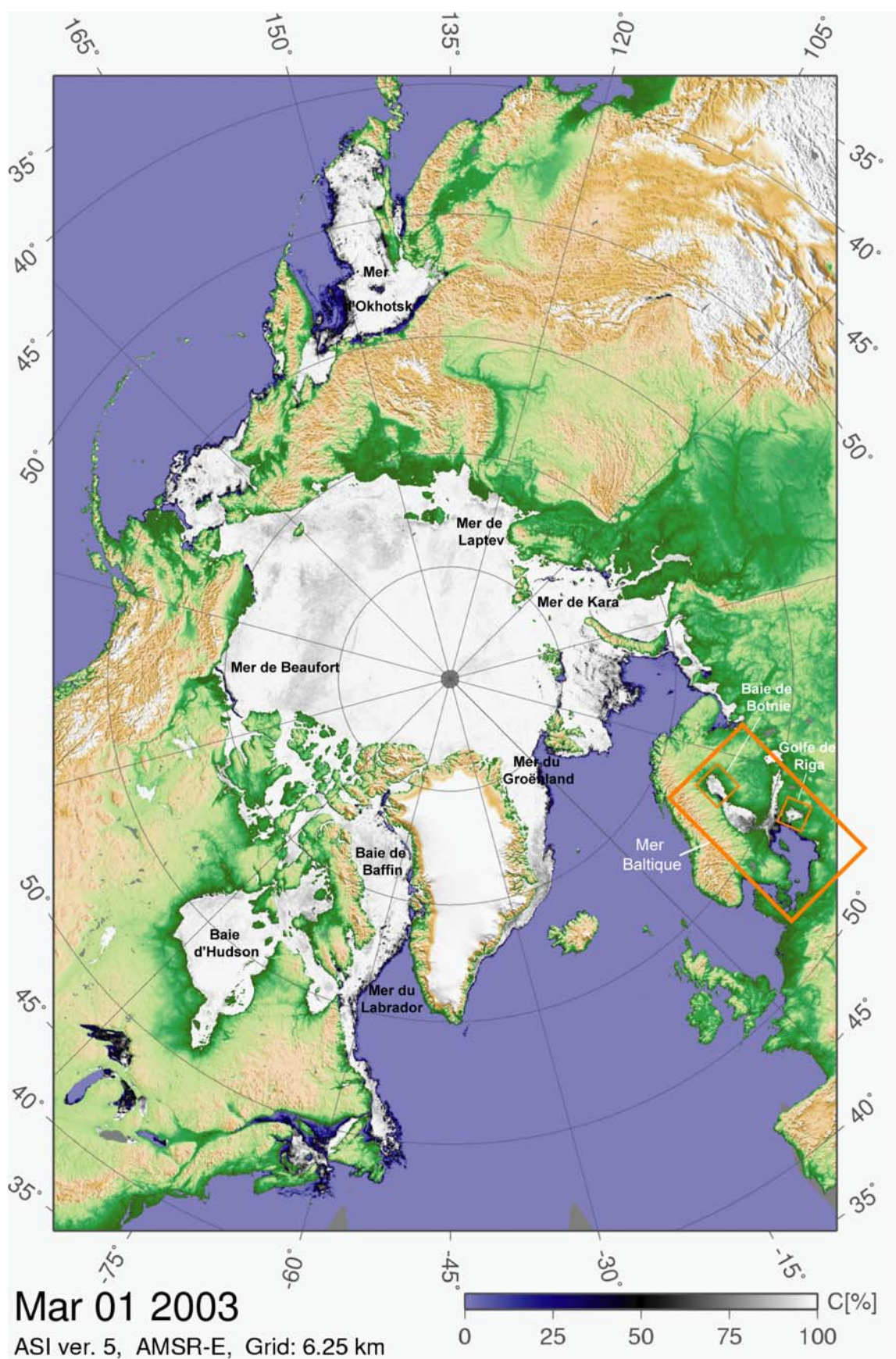
Les glaces de mer de la Baltique, comme phénomène saisonnier

Les conditions géographiques de la Mer Baltique et des régions qui la bordent, sont favorables à cette transformation du milieu et du paysage rythmée par la variation saisonnière du climat. En effet, la rudesse des températures hivernales est le moteur principal de l'englacement¹ des eaux marines – notablement douces – de la Baltique. Des températures minimales sous abri de -30°C ne sont pas rares en Finlande et en Scandinavie. Par ailleurs, la Mer Baltique bénéficie de l'effet d'abri de la chaîne des Scandes qui favorise les contrastes climatiques entre le littoral de la Mer de Norvège plus océanique, et celui du Golfe de Botnie plus « continental ». S'opposent ainsi la douceur humide de la côte norvégienne et la rigueur sèche et ensoleillée du littoral suédois. La climatologie tient donc nécessairement une place de premier plan dans les études sur la formation des glaces de mer (Roussel, 1987, 12).

Bien entendu, le climat des régions de la Baltique « *est déterminé par la succession des saisons qui obéissent aux impératifs cosmiques d'une latitude élevée* » (*ibid.*, 32). En effet, en hiver, la durée de la nuit est beaucoup plus longue qu'en été notamment dans la région d'Oulu située dans le fond du Golfe de Botnie à une latitude de 65° Nord, soit très proche du cercle polaire. La longue nuit hivernale peut durer pendant vingt heures dans une journée du mois de décembre, alors qu'en été cette nuit est quasi absente pendant quelques semaines. Ces facteurs cosmiques ont ainsi une forte incidence sur l'énergie solaire emmagasinée et le bilan radiatif de ces régions et par conséquent sur la variation des températures et leur variabilité.

Les saisons climatiques se distinguent par ce changement de température qui varie aussi en fonction des régions. Selon le FMI (*Finnish Meteorological Institute*), la période hivernale est considérée comme telle quand la température de l'air est inférieure à 0°C, les températures printanières sont comprises entre 0 et 10°C, les estivales sont supérieures à 10°C et les automnales entre 10 et 0°C. En revanche, Andris Ģermanis (2004) indique qu'en Lettonie, les températures estivales sont supérieures à 15°C.

¹ L'usage du terme « englacement » est souvent réservé au processus du développement glaciaire (aux glaces continentales de glaciers de montagne ou d'inlandsis). Toutefois, par commodité de langage, « englacement » est utilisé, ici, pour faire référence à la « prise en glace de la mer » ou à la « glaciellisation ».



Carte 1 – Localisation de la zone d'étude et état de glaciellisation des eaux polaires et subpolaires dans l'hémisphère Nord le 1^{er} mars 2003

Map 1 – Study area location and ice conditions of polar waters in the Northern hemisphere on March 1st 2003

Une telle définition des saisons basée sur les seules températures n'est pas pourtant à prendre de manière trop formelle puisque des chutes de neige printanières ou automnales ne sont pas à exclure.

D'une année à l'autre, la saison hivernale est plus précoce ou plus tardive que la précédente. Même si elle induit inévitablement une variabilité temporelle du rythme saisonnier, il existe toutefois deux saisons thermiques plus accentuées dans le Nord de la Baltique : I. Roussel qualifie ainsi l'hiver et le printemps comme appartenant au semestre froid, certes neigeux mais aussi assez sec, et l'été et l'automne au semestre chaud et pluvieux.

Or des températures négatives de l'air ne permettent pas la glaciellisation immédiate de l'eau de mer. En effet, la prise en glace des eaux marines ne se fait qu'avec un décalage temporel dû au plus lent refroidissement de la mer. Les courants, les vagues et les vents contribuent aussi à l'irrégularité du refroidissement de ces eaux. Mais par la suite, « la masse continentale s'est tellement refroidie pendant la longue nuit polaire, les glaçons ont tellement envahi la mer que, par inertie, le froid hivernal se prolonge bien au-delà de l'hiver astronomique » (Roussel, 1987, 33). La banquise entretient alors le froid et le cycle glaciaire ne peut s'achever qu'à la fin du printemps voire au début de l'été thermique (figure 1). Il est aussi important de préciser que le cycle glaciaire de la Baltique connaît une variabilité spatio-temporelle notamment entre le Nord et le Sud.

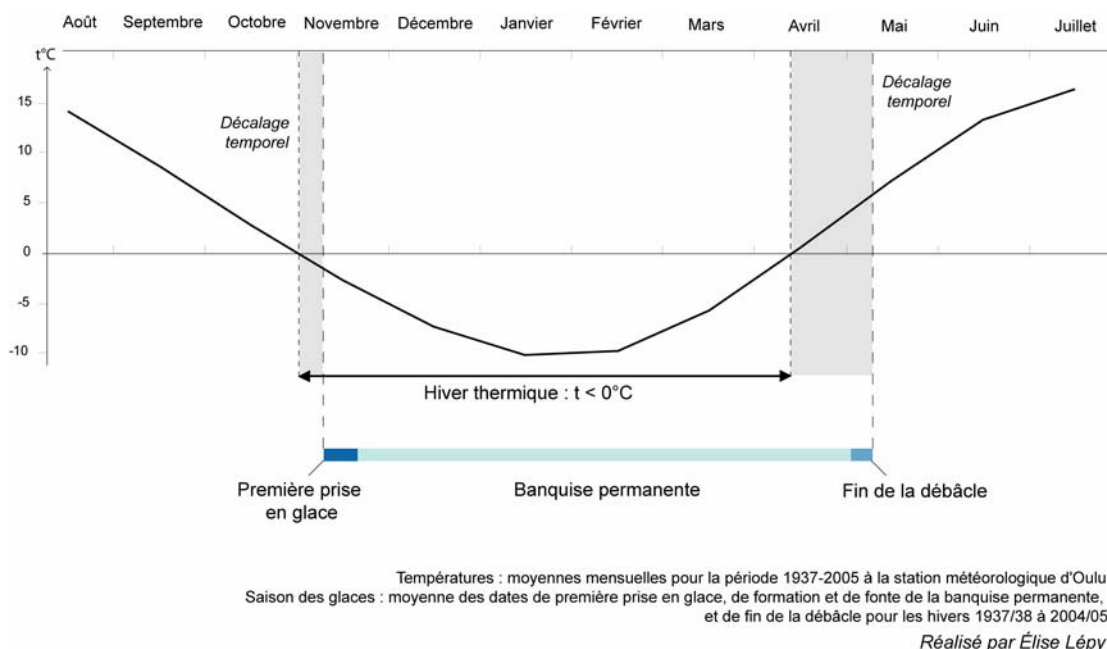


Figure 1 - Décalage temporel entre hiver thermique et saison des glaces marines à Oulu
 Figure 1 – Temporal interval between thermal winter and ice season at Oulu

D'autre part, cette recherche met en avant les notions géographiques de « mer côtière » et « littoraux », espaces marins et maritimes vitaux pour les pays Nord européens. Ces deux espaces sont ainsi variables dans leur localisation et dans leur étendue selon les saisons puisque qu'une continentalisation hivernale du milieu se déroule repoussant ainsi les limites de l'espace marin. La mer côtière perd, en quelque sorte, son sens en hiver. Bien entendu, la transformation de cet espace se répercute évidemment sur les activités qui y sont pratiquées.

Une mer aux traditions maritimes anciennes

Mer semi-fermée qualifiée de « Méditerranée du Nord », la Mer Baltique est depuis de nombreux siècles un carrefour maritime considérable pour le commerce. D'importants ports de la Baltique méridionale appartenaient à la Ligue hanséatique qui, depuis le Moyen-Âge, exerçait un important rôle commercial puis politique en Europe du Nord. L'histoire de la Baltique est connue pour avoir été, avec la Mer du Nord, un lieu d'échanges entre marchands depuis la formation de la Hanse au XII^{ème} siècle. Cette association de marchands allemands se transforma progressivement en une société de villes marchandes (cf. carte en annexe 1) qui permit une expansion rapide du commerce dans les pays septentrionaux de l'Europe grâce au développement de la marine hanséatique (Dollinger, 1988). Depuis, le trafic maritime de la Mer Baltique n'a cessé de croître et son commerce de s'internationaliser par l'invention et la diffusion de nouvelles techniques de navigation et de transports en mer ayant ainsi favorisé le processus global de mondialisation (cf. Guillaume (ed.), 2008) et faisant d'elle l'une des plus grandes autoroutes maritimes du monde. Par ailleurs, la banquise est en hiver, le lieu d'activités variées tournées vers la mise en valeur halieutique, touristique et comme espace de loisirs.

Une thématique à la fois environnementale et sociétale

La thèse se propose donc d'étudier principalement dans sa composante climato-maritime, le phénomène de prise en glace saisonnière sur les littoraux et les espaces marins proches des Golfes de Botnie et de Riga (Mer Baltique), et de considérer l'impact de ces glaces marines hivernales, de leur embâcle et de leur débâcle, sur leurs environnements physiques et humains.

Cette recherche a donc une approche disciplinaire large. Elle a, en effet, pour ambition d'analyser, aussi en les comparant, les réactions et les adaptations de deux populations bordières en Finlande et en Lettonie face à ce phénomène naturel qu'est la prise en glace des eaux de la Mer Baltique. En définitive, il s'agit ici, dans une approche globale chère aux géographes, de s'intéresser à comprendre sur ce cas précis, la

complexité systémique des relations associant la Nature et les Sociétés (Coudé et Coudé-Gaussen, 2005).

La problématique et les objectifs

Il s'agit aussi, grâce à l'étude de deux domaines littoraux de la Mer Baltique, de comprendre comment deux pays économiquement, politiquement et culturellement différents gèrent les contraintes mais aussi les atouts liés à ces phénomènes cryomarins. Il faut, en effet, prendre en compte que la Finlande, membre de l'Union Européenne depuis 1995, a été rejointe récemment dans cette Union, le 1^{er} mai 2004, par la Lettonie, indépendante depuis 18 années mais qui a été marquée par « *cinquante ans d'occupation et d'assimilation soviétiques* » (Champonnois et De Labriolle, 1999).

Ainsi, à travers l'approche comparée des deux espaces contrastés qui sont le support de cette étude, il faut aborder clairement le problème des différences de perspective et d'aménagement qui concernent la question environnementale pourtant commune de la banquise hivernale. Il est évident que les considérations d'ordre politique ou idéologique y ont un grand rôle historique et ceci jusqu'au passé le plus récent.

La question de la thématique et de l'intérêt de la thèse sera abordée particulièrement dans la première partie qui met aussi en place la problématique du sujet par rapport aux travaux qui ont déjà porté soit sur l'espace géographique baltique, soit sur la thématique générale de la prise en glace des eaux marines. Un chapitre est consacré aux caractères physiques favorisant la glaciellisation des eaux marines et aux éléments cernant l'espace d'étude. Puis, on développera particulièrement la démarche géographique sur laquelle repose la méthode de cette recherche.

La deuxième partie sera tournée vers les caractères physiques de la banquise, de sa mise en valeur en relation avec les données météo-marines et sur ses rapports avec les espaces littoraux bordiers. En effet, les conséquences de la formation de la banquise sur les milieux physique et anthropique de nos deux espaces d'étude sont d'abord déterminées par la variabilité spatio-temporelle des phénomènes. Les caractères glaciels des littoraux et de la mer côtières diffèrent inévitablement d'un site à un autre en fonction des forçages naturels qui sont à l'origine de leur formation et de leur disparition. Bien entendu, les glaces de mer sont le produit de processus climato-marins, qui seront analysés au début. De plus, les processus d'embâcle et de débâcle se répètent tous les ans. Associés à divers facteurs tels le vent, les plus ou moins faibles marées ou encore le type de côte, ils agissent sur l'érosion littorale et conduisent à s'interroger sur l'action des glaces de mer dans l'évolution du trait de côte.

En ce qui concerne les incidences sociétales et économiques du phénomène glaciaire, on comprend que la saisonnalité du processus naturel engendre des effets majeurs et récurrents sur la mise en valeur de l'espace marin. À travers l'analyse des comportements sociétaux des populations finlandaises et lettones dans les secteurs étudiés, on proposera des réponses aux questions de l'adaptation hivernale des activités humaines pratiquées autrement en eau libre et de l'apparition saisonnière de nouvelles formes d'exploitation de cet espace, en prenant compte la divergence des réactions de ces deux populations du fait de l'histoire, de l'économie et de la culture différentes. D'autre part, la forte intensité des processus glaciaires marins et littoraux, certains hivers, apparaît comme une contrainte voire un risque pour certaines activités humaines telles que la navigation maritime qui peut être entravée voir stoppée. La troisième partie veut donc répondre aux interrogations sur l'adaptation des populations côtières face aux contraintes liées à la présence de la banquise (aménagements spécifiques, rôle indispensable joué par les brise-glaces²...) et montre aussi comment elles peuvent tirer profit du phénomène qui n'est pas seulement contraignant en ce qui concerne les activités professionnelles ou ludiques.

Enfin, la dernière partie se consacre à l'analyse dans le temps des incidences socio-économiques du phénomène banquise à travers l'étude de la variabilité spatio-temporelle de ces processus climato-maritimes. La prise en compte de la dimension temporelle des glaces marines et de ses évolutions à venir est inévitable. D'autant plus, il faut le rappeler, que les mers subpolaires et arctiques sont au cœur de nombreux travaux scientifiques actuels puisque le devenir de leur état glaciaire suscite des interrogations environnementales diverses liées à la question du réchauffement climatique global. La formation et la fonte des glaces marines, de même que l'évolution – d'une toute autre échelle – des calottes glaciaires témoignent certes de la variabilité historique des refroidissements et réchauffements thermiques du globe. Il apparaît qu'une augmentation, générale ou régionale, des températures aurait un impact direct sur les conditions glaciaires de la mer Baltique, et indirect sur la vie et l'économie (navigation maritime, pêche, etc) de ses espaces et de ses rivages. Certes, cet aspect de la question est un thème « sensible » dont la forte composante médiatique échappe parfois à l'analyse rationnelle et objective. Mais il fait aussi l'objet de nombreux débats scientifiques actuels et nous essaierons, dans la mesure des possibilités liées à l'espace, certes restreint et sans doute particulier, de notre étude, d'y apporter une contribution.

² D'après le dictionnaire de l'Académie française, le mot « brise-glace » est invariable. Cependant, d'après le rapport publié dans les documents administratifs du Journal officiel du 6 décembre 1990, le Conseil supérieur de la langue française recommande d'accorder en nombre le nom « brise-glace » par un « s » ajouté à « glaces » au pluriel. Notre choix se porte donc en ce sens sur l'usage de « brise-glace » au singulier et de « brise-glaces » au pluriel.

Partie 1

L'état de la question

Chapitre 1

Position de la thèse

- 1.1 – Aperçu bibliographique sur les travaux antérieurs
- 1.2 – Les recherches abordant la question des glaces marines
- 1.3 – À propos de la notion de « glacial »
- 1.4 – Conclusion

Chapitre 2

Présentation de la zone d'étude

- 2.1 – Le cadre géomorphologique et l'évolution géologique de la Mer Baltique
- 2.2 – Le bassin-versant de la Baltique et son hydrologie
- 2.3 – Le climat de la Mer Baltique
- 2.4 – Les incidences sur le régime thermique de la Mer Baltique
- 2.5 – L'originalité de l'espace marin de la Baltique
- 2.6 – Conclusion

Chapitre 3

Approche méthodologique

- 3.1 – Le contexte géographique de la recherche
- 3.2 – L'approche qualitative
- 3.3 – L'approche quantitative
- 3.4 – La représentation spatiale des phénomènes observés
- 3.5 – Limites et critique des sources
- 3.6 – Conclusion

Cette première partie tente d'apporter de façon plus précise des éléments démontrant l'originalité du sujet. L'état de la question nécessite ainsi de faire un état des lieux des travaux déjà effectués sur la Mer Baltique et plus largement sur les glaces de mer de l'hémisphère Nord, de définir l'espace d'étude, et de préciser les orientations méthodologiques de ce travail.

Le but de cette recherche est d'apporter une contribution géographique à l'étude et à la connaissance des glaces marines de la Baltique en montrant les interrelations et interactions évidentes entre le milieu physique et les activités humaines des populations côtières. Les travaux ont été nombreux mais leur approche, souvent très spécialisée, ne permet pas toujours de prendre en considération l'ensemble des composantes du milieu. Bien entendu, la prise en considération des travaux abondants des chercheurs riverains peuvent servir à compenser les lacunes de la littérature française sur la question. Le premier chapitre propose également une « définition » du terme central de notre étude, la notion de « glacial ».

L'espace marin de la Baltique est une entité géographique en soi dont la géomorphologie, l'hydrologie, la climatologie sont essentielles à définir la meilleure connaissance générale du milieu et la compréhension fine du régime thermique de ses eaux. La Mer Baltique est une mer européenne dont l'originalité réside en la continentalisation hivernale de son espace marin du fait de la glaciellisation de ses eaux qui conduit à une appropriation et une mise en valeur originales par les populations côtières.

Si l'approche proprement géographique de cette recherche réside dans un premier temps en l'observation des faits sur le terrain, la collecte des données et les outils utilisés pour le traitement et l'analyse de l'information doivent aussi être présentés en soulignant nécessairement les difficultés méthodologiques rencontrées.

Les mers englacées font, depuis quelques décennies, l'objet de nombreuses recherches scientifiques tant par leurs caractères environnementaux, au sens large du terme, que par les considérations économiques, géopolitiques et stratégiques qu'elles suscitent. Ainsi, des domaines variés s'intéressent à l'étude des propriétés physiques de la glace, celle de la flore et de la faune aquatique en milieu englacé, aux problèmes environnementaux liés à la pollution des navires, et, bien entendu à toutes considérations socio-économiques et géopolitiques qui animent de nombreux débats. Toutefois leurs approches sont variées et souvent trop spécialisées.

Or, c'est au travers du cas de la Mer Baltique qui a, en soi, déjà sollicité l'attention de nombreux auteurs issus de disciplines scientifiques variées, que nous allons apporter notre contribution géographique. Il semble désormais opportun d'établir un bilan bibliographique de ces travaux, et de présenter aussi les recherches déjà menées sur les glaces marines afin de définir ce terme « glacial », central dans notre étude.

1.1 - APERÇU BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES TRAVAUX ANTERIEURS

Nombreux sont les auteurs et les chercheurs qui se sont penchés sur la « *mer la plus connue et la plus étudiée du monde* » (Guilcher, 1958, 128)... « *parce que ses rives sont très peuplées* » (Roussel, 1987). D'une géographie générale de l'espace baltique à l'étude de la structure des glaces flottantes, nombre de domaines scientifiques se sont intéressés à ces milieux froids d'Europe du Nord. Les peuples riverains de la Mer Baltique, notamment les Finlandais, ont largement contribué à son étude. Mais on notera que l'apport de la géographie française à l'étude dans ses divers aspects de la Mer Baltique est, encore jusqu'à présent, assez modeste.

1.1.1 - La découverte de l'Europe du Nord

Au IV^{ème} siècle av. J-C, Pythéas, explorateur et navigateur de la Grèce Antique, mène la première expédition dans les mers du Nord de l'Europe. Il est alors le premier méditerranéen à décrire des contrées jusqu'alors inconnues comme les Îles Britanniques, la Norvège, la Mer Baltique et la mythique Île de Thulé - actuelle Islande. Il y observe les

phénomènes polaires et est le premier à décrire la banquise (Georgelin et *al.*, 2002, 19). À cette époque, le Sud de la Baltique est exploité et fréquenté pour son ambre qui lui permet d'être relié à la Méditerranée par la Route de l'ambre.

Les documents les plus anciens qui décrivent la partie septentrionale du continent européen, datent des premières représentations cartographiques du monde. En effet, Claude Ptolémée (II^{ème} siècle) représente, sur sa carte du monde reconstituée au XV^{ème} siècle, l'île de Scandie - actuelle Scandinavie - entourée par les eaux de la Mer Baltique (figure 2). Plus tard lorsqu'Olaus Magnus, écrivain suédois du Moyen-Âge, réalise la première carte de la région, il y inscrit "Scandie" pour désigner la péninsule scandinave. Il délimite même pour la première fois sur sa *Carta Marina* (1539) aux contours encore imprécis, la présence et l'action des glaces marines (Magnus et Balzamo, 2005) (figure 3).

Au Moyen-Âge, les Vikings, explorateurs et commerçants scandinaves, organisent des expéditions massives en Mer du Nord, dans la Manche et en Russie. Ce sont les Varègues, vikings originaires de l'actuelle Suède, qui étendirent leur domination vers l'Est, autour de la Baltique et en Russie (Boyer, 1976). La fin du phénomène viking au XI^{ème} siècle n'a pas eu d'incidences fâcheuses sur le commerce en Mer Baltique puisque la Hanse, l'association de villes marchandes autour de la Mer du Nord et de la Mer Baltique s'est déjà installée au XII^{ème} siècle.

Alors que des explorations arctiques s'intensifiaient au XVI^{ème} siècle avec la découverte des îles de Baffin et du Svalbard et la redécouverte du Groënland (Week, 1998, 4), la fin du XVIII^{ème} siècle a vu nombre de voyageurs et explorateurs qui ont navigué en Mer Baltique et ont publié leurs mémoires. John Quincy Adams, alors futur sixième président des Etats-Unis d'Amérique, avait été envoyé pour un voyage en Europe lors de son adolescence. Dans ses mémoires "*The Diaries of John Quincy Adams*", il décrit les nouvelles contrées d'Europe du Nord dans les volumes 4, 5 et 6 écrits de juin 1781 à février 1783. Il y relate alors les conditions hivernales auxquelles il a été confronté. Quelques années plus tard, en 1786, le Britannique Matthew Consett participe à une expédition de trois mois en Europe du Nord et plus particulièrement aux abords du Golfe de Botnie dont il relate ses observations dans "*Tour through Sweden – Swedish Lapland, Finland and Denmark*" en 1789.

En 1798, l'explorateur italien Giuseppe Acerbi avait déjà fait un grand voyage dans le Nord de l'Europe et visita la Suède, la Finlande, la Laponie et le Cap Nord. Dans son récit de voyage "*Travels through Sweden, Finland and Lapland to the North Cape, in the years 1798-1799*" publié en 1802 (en français en 1804), il exposa ses observations des peuples autochtones et de leurs mœurs. G. Acerbi reste toujours le plus grand explorateur ancien pour les Finlandais. Mais ce sont surtout les récits oraux et les comptes rendus de voyages qui ont constitué les principales sources d'information ancienne sur la littérature des pays nordiques.



Figure 2 – Carte de la Scandie, reconstituée d'après la Géographie de Ptolémée, 1467
 Figure 2 – Map of Scandia, reconstructed by Ptolémée geography, 1467



Figure 3 – La Carta Marina d'Olaus Magnus, 1539
 Figure 3 – Carta Marina from Olaus Magnus, 1539

1.1.2 – Les travaux antérieurs de la recherche française

Depuis la fin du XVIII^{ème} siècle, la géographie de tradition française souhaite élaborer une géographie de portée universelle où le monde baltique est évidemment décrit. Ainsi Conrad Malte-Brun, géographe danois de culture française, consacre ses recherches à la géographie physique et à l'écriture de la première Géographie Universelle de langue française dont le sixième tome "*Europe orientale, peuples slaves*" (1833), est dédié à la description physique des provinces riveraines de la Baltique et de leurs populations. Plus tard, Élisée Reclus approfondit l'étude menée par son prédécesseur en publiant un tome de sa célèbre Géographie universelle, consacré à "*L'Europe scandinave et russe*" (1885). Au début du XX^{ème} siècle, Paul Vidal de la Blache, le grand maître de l'école française, conçoit sa nouvelle grande Géographie universelle qui ne sera achevée et publiée qu'après sa mort sous la houlette d'Emmanuel De Martonne. Il en définit le plan d'ensemble et demande à Pierre Camena d'Almeida de rédiger le cinquième tome portant sur les "*États de la Baltique – Russie*" (1932).

Dès le début du dernier siècle, les territoires nordiques ont aussi suscité un intérêt grandissant, médiatiquement illustrés par les recherches du célèbre explorateur polaire Paul-Émile Victor. Il a fait découvrir au public français, le monde arctique et antarctique à travers la diffusion de nombreuses œuvres manuscrites et filmographiques relatant ses diverses explorations dans les milieux froids. Il mit ensuite le pied à l'étrier à Jean Malaurie (Mercier, 2003), autre grand nom des recherches géographiques et ethnologiques polaires qui fonda en 1957 le Centre d'études arctiques de l'École des Hautes Études en Sciences Sociales (EHESS). C'est ainsi que les milieux polaires deviennent alors l'une des préoccupations de la recherche française.

Au cours de la seconde moitié du XX^{ème} siècle, André Guilcher, l'instigateur de la recherche géographique française sur la mer et le littoral, s'interroge sur le relief sous-marin et littoral (1954) en évoquant fréquemment le monde baltique, puis contribue avec Jacqueline Beaujeu-Garnier et Georges Chabot, à un ouvrage en trois tomes sur "*L'Europe du Nord et du Nord-Ouest*" (1958). Ces auteurs y présentent entre autres considérations géographiques générales et régionales, la géomorphologie, l'hydrologie et la climatologie de la Fennoscandie et y dressent un tableau des divers éléments caractéristiques de la Baltique en mettant particulièrement l'accent sur les processus de formation et de fonte des glaces marines et sur la navigation maritime hivernale rendue possible grâce aux brise-glaces.

Ces mêmes questions environnementales ont inspiré plus tard les travaux de Claude Kergomard qui a étudié durant de nombreuses années les interactions entre

climat, glaces de mer et océan dans les régions arctiques grâce à la télédétection (1982). Il a privilégié entre autre, l'analyse des interrelations entre climat et glaces marines (1983) et l'étude de la variabilité climatique et spatio-temporelle de l'englacement des mers arctiques européennes (1985, 1990).

Pourtant au cours de ce XX^{ème} siècle, la place accordée à l'étude régionale de la Mer Baltique par la géographie française, n'a pas été, en définitive, majeure. Nathalie Blanc-Noël (2002) dans l'ouvrage de géopolitique qu'elle a dirigé sur la région de la Baltique, parle de l'ignorance du monde francophone face au monde baltique et souligne la « *nécessité de combler une lacune dans la recherche française* » (p.17). Certes, Michel Cabouret a consacré la majeure partie de ses recherches aux territoires scandinaves et à la Finlande. Mais, ses études (plus d'une trentaine de publications) ont davantage porté sur la géographie rurale de la péninsule scandinave (1967, 1972, 1980) et de la Laponie (1987), puis sur l'aménagement des territoires et l'économie de certaines régions baltiques (1988, 1990, 1992, 2005) que sur des considérations environnementales *sensu lato*. Il s'est toutefois interrogé sur la place de la Baltique au sein de l'Europe en consacrant un dossier "*La Baltique : nouvel espace de l'Europe*" (1999) codirigé avec Céline Bayou, rédactrice de la revue "*Le courrier des pays de l'Est*" spécialisée dans la géopolitique de la Baltique orientale.

L'espace Baltique a également fait plus ou moins récemment l'objet de quelques recherches doctorales en France. D'après une enquête faite sur les sites Internet du Fichier Central des Thèses³ et du Système Universitaire de Documentation (SUDOC)⁴, vingt⁵ thèses ont été recensées sur ce domaine, la plus ancienne datant de 1856. Elles concernent des thématiques et des disciplines universitaires variées telles que la géographie et le droit qui en enregistrent le plus grand nombre (tableau 1), la médecine, la plus ancienne discipline⁶ à avoir traité de la Mer Baltique dans des études doctorales au XIX^{ème} siècle, l'histoire, les études germaniques, les sciences économiques et l'océanographie.

Les thèses strictement géographiques portant sur la Mer Baltique se sont principalement penchées sur la géopolitique, la géographie portuaire et les transports maritimes. Ainsi, Arnaud Serry, dans sa thèse récente dirigée par Pierre Thorez intitulée "*La réorganisation portuaire de la Baltique orientale – L'émergence d'une nouvelle région en Europe*" (2006), étudie le développement portuaire de la Baltique de l'Est en analysant les trafics et circulations maritimes après la disparition de l'empire soviétique. Il s'interroge sur la place de ces nouveaux espaces émergents au sein de l'Union Européenne. Mais seule la thèse d'I. Roussel intitulée "*Recherches sur les climats côtiers de la Mer Baltique*" (1987) sous la direction de Pierre Pagney a vraiment abordé un problème de géographie

³ <http://fct.u-paris10.fr/index.jsp>

⁴ <http://www.sudoc.abes.fr/>

⁵ L'étude a porté sur les titres de thèses faisant figurer le terme "baltique"

⁶ Les quatre thèses de médecine répertoriées ont été écrites pendant la deuxième moitié du (XIX^{ème} siècle)

physique. Elle traite de la saison hivernale durant laquelle le gel des étendues d'eau marines prédomine, et aborde également les contrastes saisonniers très marqués à ces latitudes. Son étude approfondie du climat de la Baltique a mis en évidence la différenciation de plusieurs climats côtiers, indispensable à notre problématique dans la présente étude (Lépy, 2003, 50).

Disciplines	Nombre							
Géographie	5	<table><tr><td>Géopolitique</td><td>2</td></tr><tr><td>Transport maritime</td><td>2</td></tr><tr><td>Climatologie</td><td>1</td></tr></table>	Géopolitique	2	Transport maritime	2	Climatologie	1
Géopolitique	2							
Transport maritime	2							
Climatologie	1							
Droit	5							
Médecine	4							
Histoire	2							
Études germaniques	1							
Sciences économiques	1							
Océanographie biologique	1							
Inconnue	1							
Total	20							

Tableau 1 – Les thèses françaises traitant de la Mer Baltique dans les diverses disciplines universitaires
 Table 1 – French doctoral thesis dealing with the Baltic Sea in various research fields

En définitive, les géographes français demeurent très peu nombreux à travailler sur l'espace baltique. Davantage de recherches géographiques ont porté sur les milieux subpolaires des côtes islandaises et norvégiennes souvent orientées sur des questions de géomorphologie ou de transports maritimes (comme la thèse d'État de J. Guillaume, 1994).

1.2 – LES RECHERCHES ABORDANT LA QUESTION DES GLACES MARINES

1.2.1 – Une recherche alors pluridisciplinaire et internationale

Les résultats des requêtes effectuées auprès de base de données bibliographiques reflètent une réelle diversité disciplinaire autour de la thématique des glaces marines. Ainsi, l'étude des mers arctiques et subarctiques sollicite les compétences variées des géophysiciens, des chercheurs en biologie marine, des géographes, des ethnologues...

Les résultats des travaux des géophysiciens, spécialistes des comportements et dynamiques des glaces marines, sont, bien entendu, essentiels à la mise en place de la présente étude. Or les chercheurs riverains de la Baltique ont énormément contribué à

l'analyse géophysique de ses glaces marines, en particulier les Finlandais (Leppäranta et *al.*, 1998, 2001 ; Seinä et Peltola, 1991 ; Seinä et Palosuo, 1996 ; Haapala, 2000a, 2000b ; Haapala et *al.*, 2001), les Suédois (Omstedt et *al.*, 2001 ; Omstedt, 2003 ; Axell, 2007) et les Allemands (Schrum et Janssen, 2003).

D'autre part, les travaux contemporains menés sur d'autres espaces marins pris en glace sont à considérer dans l'étude générale du comportement des glaces marines. Ainsi, les scientifiques japonais (Aota et *al.*, 1989 ; Ishikawa et *al.*, 2004 ; Shirasawa et *al.*, 2005) ont fourni un travail considérable sur les glaces de la Mer d'Okhotsk qui gèle tous les hivers. Il en est de même pour les Canadiens (Melling, 2002 ; Galley, 2008) et les Russes (Belchansky et *al.*, 2004, 2007) riverains de l'Océan Glacial Arctique.

1.2.2 – Les glaces marines de la Mer Baltique

Les premiers chercheurs à s'intéresser aux glaces marines de la Baltique ont été inévitablement ses riverains. À ce titre l'apport scientifique de la recherche finlandaise a été considérable depuis le XIX^{ème} siècle. En collaboration avec leurs homologues suédois en particulier, les scientifiques finlandais ont observé, analysé et étudié la nature et le comportement des glaces flottantes de la Baltique dans le but premier de permettre le fonctionnement de la navigation hivernale. Pour se faire, la mise en place d'institutions administratives et de recherche constituant un « Service des glaces de mer » dans chaque pays riverain, a été nécessaire à la compréhension des processus cryomarins qui existent saisonnièrement sur la mer et ses littoraux. Afin de partager les connaissances et découvertes faites sur le monde glacial de la Baltique, des rencontres scientifiques ont été et sont toujours organisées.

1.2.2.1 – L'apport de la recherche finlandaise

La neige et la glace sont des caractéristiques naturelles évidentes des paysages finlandais pendant la moitié de l'année. Ils constituent ainsi un champ de recherche inévitable pour les scientifiques du pays. Dans un article important et fort commode publié en 2001, Matti Leppäranta et *al.* retracent l'historique de la géophysique (approche glaciologique) des glaces flottantes de la Mer Baltique depuis le début du XIX^{ème} siècle, période à laquelle furent enregistrées les premières mesures d'épaisseur de glace ainsi que les premières dates d'embâcle et de débâcle.

En effet, avec le développement du trafic maritime hivernal, de multiples stations d'observation ont été implantées le long des côtes baltiques et pendant la première moitié du XX^{ème} siècle, l'une des principales motivations de la recherche scientifique d'Europe du Nord a été l'étude du comportement des glaces de la Mer

Baltique. Le FIMR (*Finnish Institute of Marine Research*)⁷ a été créé pour réaliser le suivi cartographique des conditions glacielles devenu nécessaire et pour l'étude des conditions de navigation. En 1937, Risto Jurva, pionnier de la recherche sur les glaces en Mer Baltique, présente dans sa thèse de doctorat rédigée en allemand et intitulée "*Über die Eisverhältnisse des Baltischen Meeres an den Küsten Finnlands*"⁸, un système cartographique afin de mieux appréhender l'évolution des conditions de glace. Il étudiait ainsi les conditions climatologiques de la mise en place des glaces de la Mer Baltique puis reconstituait plus tard l'évolution de l'extension annuelle maximale du couvert de glace de la Baltique depuis 1720 (Jurva, 1952a, 1952b).

À la fin des années 1930, les observations aériennes se sont aussi développées et elles ont permis une meilleure reconnaissance spatiale des phénomènes glaciels de la Baltique. Pendant la Seconde Guerre Mondiale, les survols de la Mer Baltique s'intensifient entre l'Allemagne et la Finlande, et Erkki Palosuo, alors officier de l'Armée de l'Air, est en charge de la cartographie des glaces marines (Leppäranta et al., 2001, 267). Il propose, en 1953, dans sa thèse de doctorat en anglais intitulée "*A treatise on severe ice conditions in the Central Baltic*", d'élargir le système cartographique de R. Jurva aux conditions hivernales sévères et présente alors la première description approfondie de la nature des glaces flottantes dans la Mer Baltique.

Au début des années 1960, la Finlande et la Suède entament une collaboration qui aboutira, en 1982, à la réalisation d'un atlas traitant les informations statistiques sur les conditions de la prise en glace "*Climatological ice atlas for the Baltic Sea, Kattegat, Skagerrak and Lake Vänern*" (SMHI et FIMR) : c'est toujours, à ce jour, le seul atlas à offrir des informations détaillées sur les glaces flottantes de la Mer Baltique.

Dans leur article déjà cité, M. Leppäranta et al. (2001) soulignent aussi le rôle des géographes finlandais dans l'étude des impacts géomorphologiques du mouvement des glaces flottantes sur les côtes. En effet Jouko Alestalo, alors géographe à l'Université d'Oulu, et Jukka Häikiö (1976) ont cartographié l'évolution du trait de côte due à l'accumulation de glace sur certaines rives de la Baie de Botnie à l'aide de photographies aériennes, puis J. Alestalo et al. (1986) signalent, dans leur étude sur la déformation de la glace de mer près d'Hailuoto, la plus haute accumulation (14 mètres) de glace mesurée sur les côtes de la Baltique.

Bien entendu, la cartographie de l'état des glaces marines a connu une amélioration technique majeure grâce à l'arrivée du satellite. Le FIMR étudie ainsi en 1981 sa première image satellitaire NOAA (Leppäranta et al., 2001, 271). Au même moment, les géophysiciens travaillent sur les dynamiques maritimes des glaces, leur état de surface et leur dynamique par télédétection. Dans les années 1980 et 1990, des séries d'expérience de terrain ont lieu en Finlande pour mettre en scène l'exploitation des données du radar SAR

⁷ Des éléments d'information sont précisés dans le paragraphe concernant les services des glaces

⁸ Traduction : À propos des conditions de glace de la Mer Baltique sur les côtes de Finlande

(Synthetic Aperture Radar) du satellite ERS-1 lancé en 1991 (Thompson et Leppäranta, 1987 ; Leppäranta et Thompson, 1989 ; Leppäranta et Lensu, 1992 ; Leppäranta et *al.*, 1998). Enfin, ces dernières années, les scientifiques finlandais se sont tournés vers des questions d'ordre environnemental concentrant leurs programmes tels que BASYS (Baltic Sea System Study) sur la pollution et la protection de la Mer Baltique à travers l'étude des glaces.

1.2.2.2 – Les Services des glaces de la Mer Baltique

Étant l'une des voies maritimes les plus fréquentées du monde, la Mer Baltique enregistre un fort trafic durant toute l'année. La navigation hivernale, malgré des conditions glacielles qui peuvent lui être peu favorables, reste une activité dominante indispensable pour les ports de la Mer Baltique. L'intérêt porté à l'observation et à l'analyse des glaces marines est ainsi essentiel pour le suivi et l'assistance des navires. Les conditions glacielles sont donc au cœur des préoccupations de nombreux instituts de recherche et services et les neuf pays riverains de la Baltique détiennent chacun un Service des glaces plus ou moins efficient selon l'occurrence de la formation des glaces sur ses propres littoraux. C'est d'ailleurs dès la fin du XIX^{ème} siècle que les services nationaux des glaces de ces pays commencèrent les premières observations.

Localisé à Helsinki en Finlande, le service des glaces du FIMR est l'un des plus anciens organismes à s'être intéressé aux conditions marines. D'ailleurs l'observation des glaces marines est une longue tradition en Finlande puisqu'en 1846 les premières observations sur les glaces marines au monde y ont été faites, une trentaine d'années même avant que la navigation hivernale ne commence avec la mise en activité de l'ancêtre des brise-glaces actuels. Jusqu'en 1915, les observations sur les conditions des glaces marines étaient effectuées tous les mois par les gardiens des phares. Pendant la Première Guerre Mondiale, le besoin croissant d'informations a entraîné la réalisation de cartes des glaces une fois par semaine, ce qui a conduit à la création du premier Service des glaces. À la suite de l'établissement du FIMR en 1918, la recherche sur les glaces est devenue l'une des principales activités du Service (Grönwall, 1988, 102). À l'heure actuelle, le Service des glaces du FIMR dirigé par le Ministère du Transport et des Communications, travaille en collaboration avec le Conseil National de la Navigation (*National Board of Navigation*) sur trois systèmes d'opération : un réseau d'observation des glaces, un système d'analyse et de prévision de la formation des glaces et un système d'information et de communication de l'état des glaces (*ibid*, 103).

Riveraine du Golfe de Botnie, la Suède a aussi une activité importante dans le domaine de l'observation des glaces marines. Son service des glaces fait partie du SMHI (*Swedish Meteorological and Hydrological Institute*), organisation gouvernementale sous la tutelle du Ministère de l'Environnement et du Développement Durable. Cet institut se

préoccupe depuis de nombreuses années des questions concernant les conditions glacielles en Mer Baltique et depuis la dernière décennie se focalise sur la télédétection des glaces marines en utilisant le SAR (Lundqvist, 2003, 39). Le service des glaces de Suède a également entrepris une autre recherche sur le climat des glaces marines de la Baltique intitulée "*Baltic Sea Ice Climate*" qui retrace l'histoire climatique de la Mer Baltique à travers l'analyse de longues séries de variables diverses telles que l'extension des glaces.

Le Golfe de Riga, espace d'étude de comparaison du présent travail, est bordé par la Lettonie et l'Estonie qui doivent aussi faire face aux problèmes de la navigation pendant l'hiver. Le service des glaces de Lettonie situé à Riga, appartient au Département d'hydrométéorologie de la LEGMA (*Latvian Environment, Geology, and Meteorology Agency*), agence gouvernementale qui n'opère que depuis 2005. Certes un premier institut avait été créé en 1920 mais il ne répondait qu'à des considérations météorologiques. Il a évolué en intégrant d'autres services et en s'associant à d'autres instituts. Cependant, le service des glaces, quant à lui, n'est toujours pas très développé. Il détient neuf stations côtières permettant d'enregistrer les paramètres glaciels du littoral du Golfe de Riga, mais utilise le plus souvent les services d'autres instituts nationaux pour recevoir des informations.

L'Estonie dont les côtes bordent à la fois le Golfe de Riga et celui de Finlande, a également ses eaux littorales prises en glace tous les hivers. Son service des glaces est l'une des structures du EMHI (*Estonian Meteorological and Hydrological Institute*), institution gouvernementale du Ministère de l'Environnement. Les informations sur les glaces marines y sont étudiées par le service de prévision du temps en mer qui travaille aussi en collaboration avec les universités et d'autres établissements étrangers.

La question des glaces marines du Golfe de Finlande intéresse également les côtes de la Russie qui possède un très important service des glaces qui, bien entendu, intervient également sur les côtes arctiques de Sibérie. Il fait partie du Service fédéral russe nommé *North-Western Regional Administration for Hydrometeorology and Environmental Monitoring*.

D'autres services des glaces existent, notamment ceux localisés dans la Baltique Sud. En Allemagne, l'Agence fédérale maritime et hydrographique, *Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie*, a pour but d'améliorer la sécurité maritime et la protection environnementale marine. Elle émet un important travail sur les conditions des glaces marines de la Mer Baltique en utilisant les outils satellitaires. Le Danemark, la Pologne et la Lituanie possèdent également chacun un service des glaces appartenant aux institutions respectives : *Admiral Danish Fleet*, *Institute of Meteorology and Water Management* et *Lithuanian Hydrometeorological Service*.

Des documents utilisés dans le cadre du présent travail, sont issus des travaux menés par certains de ces services. En effet, le FIMR, le SMHI et l'Agence fédérale

maritime et hydrographique d'Allemagne émettent régulièrement des cartes sur les conditions de glace en Mer Baltique. Ces cartes (figure 4) sont réalisées à partir d'images satellitaires, émanant principalement des satellites météorologiques américains (NOAA), mais également par SAR et par des observations faites lors de survols aériens et des informations provenant des brise-glaces, des navires et des différentes stations. Elles sont prioritairement destinées à la navigation et aux activités pratiquées sur la banquise.

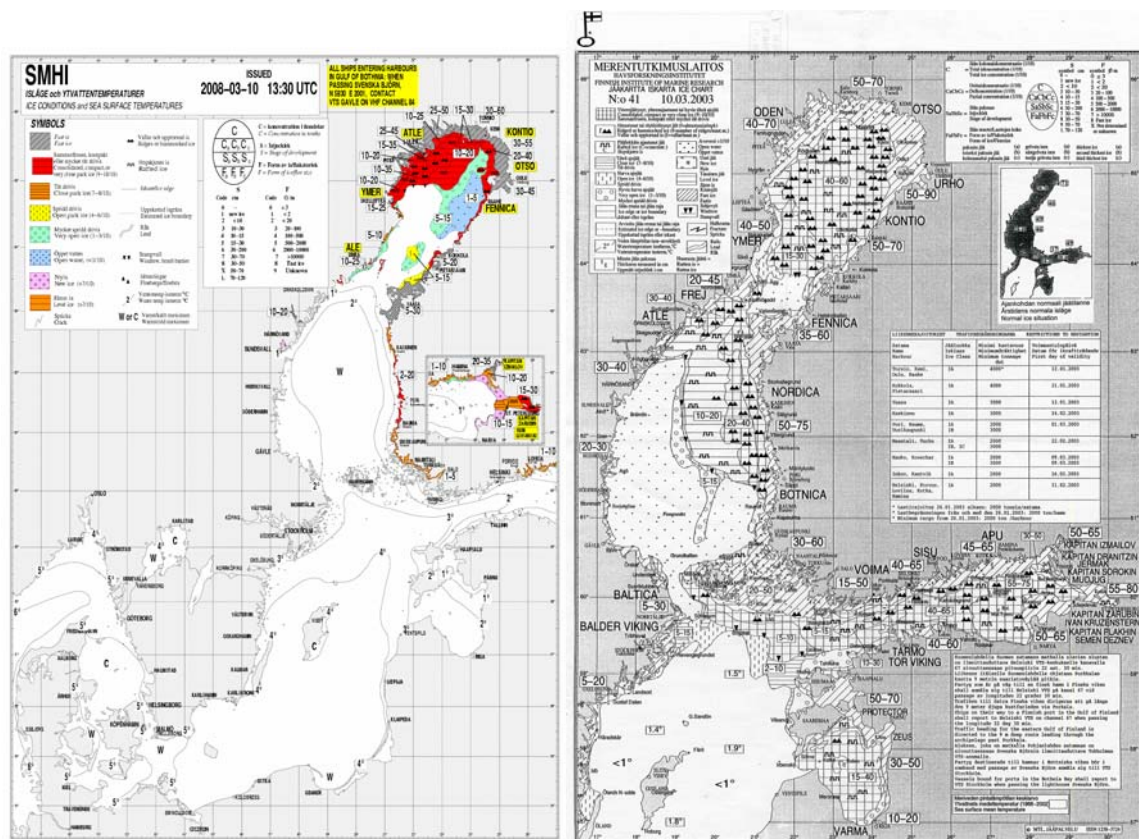


Figure 4 – Exemples de cartes sur les conditions glacielles émises par le SMHI (à gauche) et le FIMR (à droite)
 Figure 4 – Examples of ice conditions maps from SMHI (left) and FIMR (right)

Les services suédois et finlandais fournissent également des rapports concernant l'état glaciologique de la Mer Baltique. Ces rapports relatent pour chaque région particulière de la Baltique, le type et l'épaisseur de la glace, les restrictions à la navigation et les brise-glaces en service. En annexe 2 figure un exemple significatif de ce type de rapport.

Ces instituts publient aussi de nombreux ouvrages et contribuent à des revues scientifiques. Le FIMR est très actif au niveau des contributions. La revue intitulée "Finnish Marine Research" (*Merentutkimuslaitoksen Julkaisu*) publiée depuis 1920 regroupe divers articles traitant de la Mer Baltique sous différents points de vue (biologie, géophysique...), mais également des données statistiques sur les conditions glacielles (extension, épaisseur...). Il en est de même pour MERI, "Report Series of the Finnish

Institute of Marine Research" qui, depuis des décennies, fait état des recherches en cours sur la Mer Baltique.

1.2.2.3 – Les rencontres scientifiques autour de la question des glaces de la Mer Baltique

Comme on l'a vu ci-dessus, les glaces marines de la Baltique sont au cœur des préoccupations de nombreux chercheurs et organismes scientifiques régionaux depuis de nombreuses décennies. Après la création d'établissements nationaux de climatologie et d'hydrologie continentale et marine au début du siècle passé, il s'est en effet avéré important d'organiser des tables rondes communes auxquelles participent les chercheurs s'interrogeant sur les conditions glacielles de la Mer Baltique.

Fondé en 1925, le BSIM (*Baltic Sea Ice Meeting*) organise ainsi des rencontres qui se tiennent à des intervalles de trois-quatre ans, afin d'aider les Services des glaces de la Mer Baltique à mieux répondre aux besoins des navires nationaux et autres, à travers la coordination et la coopération concernant le partage de données, d'informations diverses etc. La plupart des Services des glaces ainsi que les autorités responsables de l'activité des brise-glaces participent à ces rencontres. La première, en 1925, à Hambourg a eu pour but d'échanger les observations effectuées sur les glaces marines et de discuter du Code des glaces (définition des états de la banquise) appliqué en Mer Baltique. Dans la décennie qui a suivi, diverses conférences hydrologiques se sont déroulées avant la Seconde Guerre Mondiale pendant laquelle et jusqu'en 1954 aucune rencontre n'a été organisée. Au cours des rencontres postérieures, les experts ont adopté un nouveau Code des glaces marines (annexe 3), établi une symbologie commune aux cartes des conditions glacielles, et institué une liste terminologique commune sur les glaces marines (SMHI, 1981)... En 1979 l'usage de la télédétection est entré au cœur des discussions. La plupart des rencontres du BSIM durant les deux dernières décennies, sont ainsi consacrées à l'utilisation des outils satellitaires pour l'observation et l'analyse des phénomènes glaciels, mais également pour l'aide à la navigation. En septembre 2008 s'est organisée ainsi la 23^{ème} rencontre du BSIM à Helsinki.

Parallèlement aux rencontres du BSIM destinées à mettre à profit les connaissances scientifiques pour l'assistance des navires pendant la période hivernale, le Département de Géophysique de l'Université d'Helsinki a mis en place, au début des années 1990, un groupe de travail nommé "*Baltic Sea Ice Climate*" qui se réunit tous les trois ans. L'objectif est de rassembler des chercheurs pour discuter de la variabilité climatique et des conditions des glaces de la Mer Baltique en échangeant des données et résultats afin de créer une base de données nécessaire à la modélisation des glaces marines (Leppäranta, 2007, 15). Depuis 1993, date du premier Workshop, le groupe de travail s'est réuni cinq

fois. La dernière rencontre en date a eu lieu en 2005 à Hambourg où une contribution⁹ issue de notre présente recherche a pu être exposée et a donné lieu à une publication sur l'influence de la température sur les conditions glacielles dans la Baie de Botnie (Lépy, 2007) dans la revue scientifique de l'Agence fédérale maritime et hydrographique d'Allemagne (*Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie*).

1.3 – À PROPOS DE LA NOTION DE « GLACIEL »

La glaciellisation des eaux marines est la notion centrale de ce travail. Elle ne se limite pas qu'aux seuls phénomènes physiques mais déborde plus largement par ses implications environnementales, sur des considérations de géographie humaine.

1.3.1 – L'origine du terme « glacielle »

En Amérique du Nord, les premières observations sur l'action géologique et géomorphologique des glaces flottantes remontent au début du XIX^{ème} siècle : Petros (1822), Adams et Wood (1825) consacrent avec le gallois Lyell (1843) plusieurs pages à l'action des glaces flottantes. Quelques années plus tard, Dawson porte une étude précise sur les rives du Saint-Laurent (Dionne, 1972, 3). Mais c'est à partir de la deuxième moitié du XX^{ème} siècle que la question des glaces flottantes va être davantage développée et mise en lumière. Le terme « glacielle » est alors introduit dans la littérature scientifique après sa création, en 1959, au Québec par le géographe Louis-Edmond Hamelin. Afin d'éviter la confusion avec l'action des glaces continentales (Hamelin, 1994, 54) qui se réfèrent au terme « glaciaire » et de pouvoir définir tous les processus et aspects rattachés aux glaces flottantes (glaciologiques, physiques, mais aussi humaines et économiques...), L-E. Hamelin crée un néologisme, le mot « glacielle ». Il le définit comme se rapportant à « l'ensemble des états, processus et effets des glaces flottantes » (*ibid.*, 54-55). Dans son article de 1972, Jean-Claude Dionne précise que le glacielle concerne « l'ensemble des processus, formes et sédiments qui sont associés à l'action des glaces flottantes (glaces annuelles et icebergs) [...] ». Suivant le milieu, le glacielle est dit littoral, marin, estuarien, lacustre ou fluvial. Il englobe tous les aspects : glaciologique, hydrologique, morphologique, sédimentologique, biologique et humain ».

D'après J-C. Dionne, il a fallu attendre quelques années pour que le concept de glacielle puisse être définitivement intégré au système périglaciaire (Dionne, 1972, 5) et rappelle que « c'est Cook (1959) et Hamelin (1961) qui ont définitivement classifié le glacielle parmi les processus périglaciaires ». De plus, dans son article consacré à la "Bibliographie du

⁹ Poster présenté au Fifth Workshop on Baltic Sea Ice Climate, Hambourg, Allemagne, 31 Août – 2 Septembre 2005 : "Spatial and temporal variability of ice growth and melting of waters of the region of Oulu-Marjaniemi (Gulf of Bothnia)", É. Lépy

périglaciaire du Québec, 1969-1989, incluant le glaciél pour la période 1960-1989", J.-C. Dionne rappelle en 1989, la contribution majeure du Québec dans le domaine du périglaciaire.

Outil lexical qui a servi de nombreux chercheurs, le terme glaciél s'étend désormais à d'autres expressions telles que la glaciellisation de eaux marines, le cycle glaciél (période s'étendant du début de l'englacement automnal jusqu'à la fin du déglacement estival)... et a permis de qualifier et de définir avec plus de précision ce type de glace marine qui est au cœur de notre étude.

1.3.2 – La sémantique des glaces flottantes

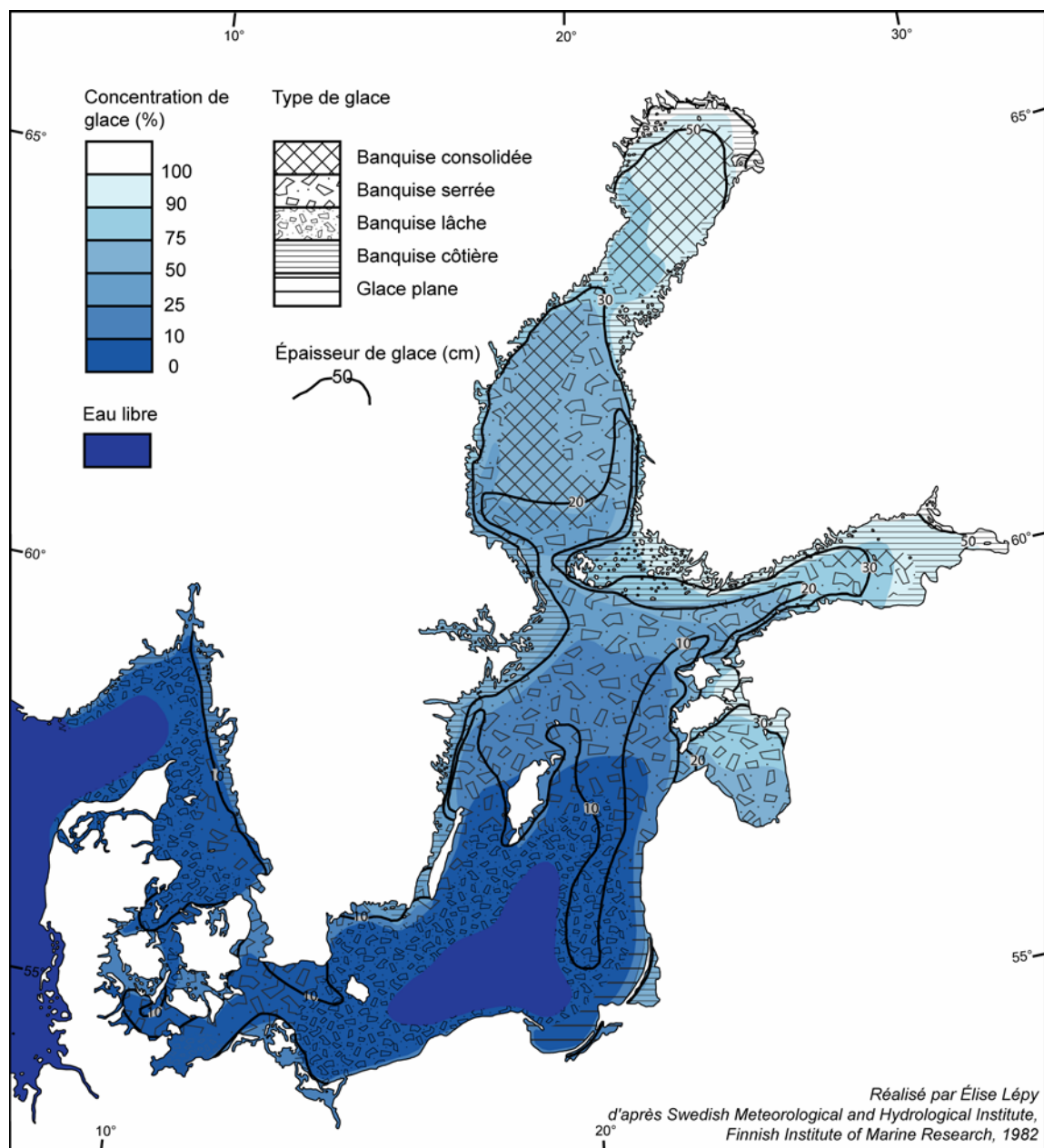
L-E. Hamelin (1994, 53) définit le terme « glaciél » en langue anglaise comme étant « *an adjective and noun, created in Quebec in 1959 to render "floating ice"* ». Dans leur ouvrage sur « *Le périglaciaire par l'image* », L-E. Hamelin et F. Cook (1967) traduisent le chapitre sur la glaciellisation par « *floating ice forms* ». Il est aisé de comprendre que la langue anglaise n'a pas d'équivalent et qu'elle se réfère tout simplement aux glaces flottantes. La langue finnoise propose le terme « *ajelehtiva jää* » qui signifie de façon générale « *glace à la dérive* ».

L'étude des glaces de mer se réfère souvent non seulement au glaciél mais également au « *cryomarin* ». Ce terme dont la racine grecque *kryos* se rapporte à tous les éléments qui sont associés à la glace, à la neige et plus généralement au froid. La terminaison du terme nous rappelle que ces éléments se situent en mer contrairement aux processus glaciels qui agissent aussi bien en mer, que dans les lacs et cours d'eau. En revanche, si l'on se réfère à des phénomènes de glace et de neige sur un littoral, on les qualifiera de « *cryolittoraux* ».

En 1970, l'Organisation Météorologique Mondiale a établi une nomenclature des glaces reprise par tous les services de glace existants. Il existe une multitude de glaces flottantes. La carte 2 en illustre quelques unes. Le couvert de glace varie en fonction de la température de l'eau et des courants, des marées et des vents qui ont une incidence déterminante sur la formation et la déformation de la *banquise* ou *pack* (*pack ice*).

Les eaux des zones peu profondes et peu salées sont les premières à prendre en glace. Les eaux des archipels sont davantage exposées à l'englacement ainsi que les eaux côtières. Se forme alors le long de la côte de la *glace fixe* (*fast ice*) qui constitue une frange côtière attachée au rivage. En Mer Baltique la *banquise côtière* (photographie 1) est formée sur place chaque hiver (*young coastal ice*) variant de quelques mètres jusqu'à 200 mètres de largeur à partir de la côte. Par la suite, en fonction des conditions météorologiques, des blocs de glace se détachent de cette banquise et étendent l'englacement vers la haute mer. En plein cœur de l'hiver, le golfe de Botnie est recouvert d'une *banquise consolidée* (photographie 2) où l'eau libre ne peut être visible. Cependant à certains endroits, la

banquise y est moins dense et composée de *floes* (fragments de glace de mer relativement plats) dont la plupart sont en contact. La *banquise serrée* voire très serrée (*close pack ice*) domine principalement en Mer de Botnie et dans les Golfes de Riga et de Finlande. Au début de la débâcle, les états de la banquise se modifient : la banquise consolidée devient *lâche* (*open pack ice*, photographie 3), la densité superficielle moyenne de sa glace est de 4/10 à 6/10, et y apparaissent de nombreux *chenaux* et *polynies* (ouverture non linéaire enclose dans la glace) alors que les floes ne sont généralement pas en contact les uns avec les autres ; puis *très lâche* (photographie 4) quand il y a plus d'eau que de glace, les morceaux de glace étant alors caractérisés par des bords rebroussés par les chocs entre eux (*pancake ice*).



Carte 2 – Caractéristiques glacielles moyennes en Mer Baltique au 1^{er} mars
Map 2 – Average ice conditions in the Baltic Sea on March 1st



Photographie 1 – Banquise côtière – Nallikari – Mars 2007
Picture 1 – Fast ice – Nallikari – March 2007



Photographie 2 - Banquise consolidée après le passage de la navette brise-glace reliant Oulunsalo à l'île d'Hailuoto – Mars 2005
Picture 2 – Consolidated ice after the boat crossing the sea from Oulsalo to Hailuoto island – March 2005



Photographie 3 - Banquise lâche - Toppila - 29 mars 2005
Picture 3 - Open pack ice - Toppila - March 29th 2005



Photographie 4 - Banquise très lâche - Toppila - 15 avril 2005
Picture 4 - Very open pack ice - Toppila - April 15th 2005

Le couvert de glace peut subir des pressions d'agents externes tels le vent, les marées ou les courants susceptibles de modifier l'aspect de sa surface. Les déformations du couvert de glace sont le résultat de glaces qui ont été comprimées les unes contre les autres, et de ce fait, qui ont été relativement soulevées ou effondrées. Il en résulte trois grands types de déformations : la *glace empilée* (*rafted ice*) due à un chevauchement des plaques de glace les unes aux autres ; la *crête* (*ridge*), mur de glace brisée soulevée par la pression ; et la *glace hummockée* (*hummocked ice*), monticule de glace brisée et empilée formant une surface irrégulière. Quand la glace de mer n'a subi aucune déformation, elle est qualifiée de *glace plane* (*level ice*). Ces divers phénomènes sont étudiés dans la deuxième partie.

1.3.3 – Les contributions scientifiques à la question de l'érosion glacielle

De nombreuses contributions québécoises ont porté sur l'action morpho-sédimentologique des glaces flottantes, sur les aspects principaux de l'érosion, du transport et de la sédimentation des matériaux (Hamelin et Letarte, 1966 ; Tremblay, 1967 ; Dionne, 1972, 1973, 1987 ; Allard et Champagne, 1980 ; Hamelin, 1994). En particulier, Dionne a largement contribué à l'apport de la géomorphologie québécoise sur le glacielle en rédigeant sous la direction de A. Guilcher une thèse de Doctorat sur les "*Aspects morpho-sédimentologiques du glacielle, en particulier des côtes du Saint-Laurent*" (1970) puis plus tard, en organisant le premier congrès international sur "*Le glacielle*" (1974) à Québec. Ce congrès a porté sur l'action géologique et géomorphologique des glaces flottantes et inévitablement sur l'érosion glacielle, sachant que l'estuaire du Saint-Laurent a été le lieu de prédilection des recherches scientifiques québécoises (Dionne, 1969, 1973).

Dans ce colloque, Annick Moign a insisté sur le rôle du pied de glace, bande de glace soudée à la côte et qui reste en place quand la banquise côtière est partie en dérive, et sur son action érosive par arrachement rocheux sur les côtes du Spitzberg (Moign, 1976), espace d'étude de ses propres recherches doctorales (Moign, 1973). Elle encadre par la suite les travaux d'Arnaud Héquette qui consacre une partie de sa thèse intitulée "*Morpho-sédimentologie et évolution des littoraux meubles en milieu arctique*" (1986), à la dynamique des processus glaciels sur les littoraux de la péninsule de Brögger au Spitzberg. Ce dernier poursuit ultérieurement ses recherches sur le littoral canadien et publie en 1989 un article sur "*L'influence de la glace de mer sur l'érosion littorale de la Mer de Beaufort canadienne*" où il précise que « *l'érosion littorale ne peut être expliquée uniquement par l'énergie des vagues à la côte et par des processus de thermo-érosion, mais aussi par l'action des glaces flottantes* » et conclut en ajoutant que « *la glace de mer n'aurait pas qu'un rôle protecteur sur les littoraux en limitant l'énergie des vagues, mais qu'elle contribuerait à leur érosion* ».

Malgré la prédominance de travaux de chercheurs canadiens et américains sur leurs littoraux à l'occasion du colloque de 1974, les glaces flottantes de la Mer Baltique y

ont pourtant suscité la présentation de deux études : l'une finlandaise, portant sur l'action des glaces sur les rives du golfe de Finlande (Mansikkaniemi *in* INRS, 1974) ; et l'autre polonaise, s'intéressant à l'action des glaces et du gel dans le développement des plages de la Baltique en climat tempéré (Brochwicz-Lewinski et Rudowski *in* INRS, 1974).

En Mer Baltique, les chercheurs s'intéressent de fait à l'érosion glacielle dans les années 1970. Hannu Mansikkaniemi (1976) mène une étude démontrant le rôle des glaces de mer et plus précisément celui du pied de glace sur la morphologie littorale à travers le déplacement des matériaux sableux et grossiers des rives du Golfe de Finlande. À la même période, J. Alestalo (1979) présente les différentes formations de glace rencontrées dans le Golfe de Botnie et leurs actions érosives sur le littoral de Luodonselkä (proche d'Oulu).

La question de l'érosion littorale en Mer Baltique est évidemment intéressante dans la mesure où l'évolution du trait de côte est due d'une part aux mouvements glacio-isostatiques positifs toujours actifs notamment dans le Golfe de Botnie, et d'autre part au rôle géomorphologique des glaces marines sur l'impact duquel il semble très opportun de s'interroger. Durant les mois d'hiver, la banquise côtière attachée au rivage, reste fixe le long de la côte. Elle participe alors à la protection du littoral face à l'action des vagues, des courants et des marées. Dans les golfes de la Mer Baltique, la nappe glacielle entrave voire interdit l'action de ces agents marins habituels pendant quatre mois de l'année. Mais outre ce rôle de protection, on peut s'interroger sur l'activité érosive des glaces flottantes en particulier quand elles sont mobiles, soit au début de la prise en glace, soit surtout au moment de la débâcle printanière où les dépôts meubles se ramollissent aussi du fait de la fusion de la glace de sol. En effet, sur d'autres littoraux froids, ces glaces sont « *capables de polir, d'égratigner, de strier et de rainurer les roches tendres* » comme l'a signalé J.-C. Dionne au Québec (1972, 9). Elles érodent également le fond « *en prélevant une quantité déterminée de matériel meuble qu'elles déplacent sur des distances plus ou moins grandes* » (*ibid.*, 10).

1.4 – CONCLUSION

L'objet d'étude de la thèse, les glaces de mer, est au cœur de nombreuses préoccupations scientifiques de domaines variés. Toutefois, l'approche environnementale et sociétale que nous empruntons pour les traiter n'a, jusqu'à lors, pas été utilisée dans le cadre d'une étude sur la Mer Baltique.

De plus, la thèse s'inscrit dans une étude régionale qui, à des échelles spatiales et temporelles différentes, permet la comparaison et/ou la complémentarité de deux entités géographiques de la Mer Baltique : la Baie de Botnie et le Golfe de Riga. D'autre part, elle contribue également à une étude de géographie littorale globale, approche générale

privilegiée par les chercheurs de l'UMR LETG 6554 CNRS. En effet, ces dernières années ont vu de nombreuses publications traiter du littoral tout en associant la géographie physique de ce milieu à son utilisation par la société qui en détermine l'aménagement (Paskoff et Verger, 1999, 3 ; Lageat, 2004). L'approche systémique dans l'étude du domaine littoral (Costa et *al.*, 2005) s'intègre bien dans les courants actuels de la géographie des littoraux.

On voit bien alors l'intérêt d'une telle recherche et les objectifs qu'elle suscite. Il semble alors judicieux par la suite de décrire tous les éléments géographiques qui définissent le milieu considéré afin de mieux appréhender les processus glaciels en Mer Baltique.

Présentation de la zone d'étude

Parmi les mers européennes les plus septentrionales, la Mer Baltique s'étend latitudinalement du 53° 54' Nord (frontière germano-polonaise) au 65° 54' Nord (Kalix, Suède) et longitudinalement du 9° 25' Est (Kattegat) au 30° 12' Est (embouchure de la Neva, Russie). C'est une mer semi-fermée reliée à l'Océan Atlantique par la Mer du Nord au-delà des détroits danois. Bordés par neuf états (Suède, Finlande, Russie, Estonie, Lettonie, Lituanie, Pologne, Allemagne et Danemark), ses littoraux sont peuplés et localisent de grandes villes côtières et portuaires de tradition hanséatique pour certaines, telles Lübeck, Stockholm, Riga, Turku ... Sa population riveraine s'élève à 85 millions d'habitants. Bien que considérée comme partie intégrante du domaine froid, la Mer Baltique est toutefois bordée par des espaces qui ne présentent pas partout les mêmes conditions naturelles et géographiques, sachant pourtant que certains d'entre eux effleurent le cercle polaire arctique.

L'hydrographie de la Mer Baltique est déterminée par quatre facteurs : la topographie du bassin, l'échange d'eau marine par les détroits danois, l'apport d'eau douce à la mer par les cours d'eau, et l'interaction mer - atmosphère par le régime des précipitations pluvieuses ou neigeuses et l'évaporation. Son régime thermique est ainsi influencé par différents facteurs naturels, qui jouent leur rôle dans la glaciellisation de ses eaux.

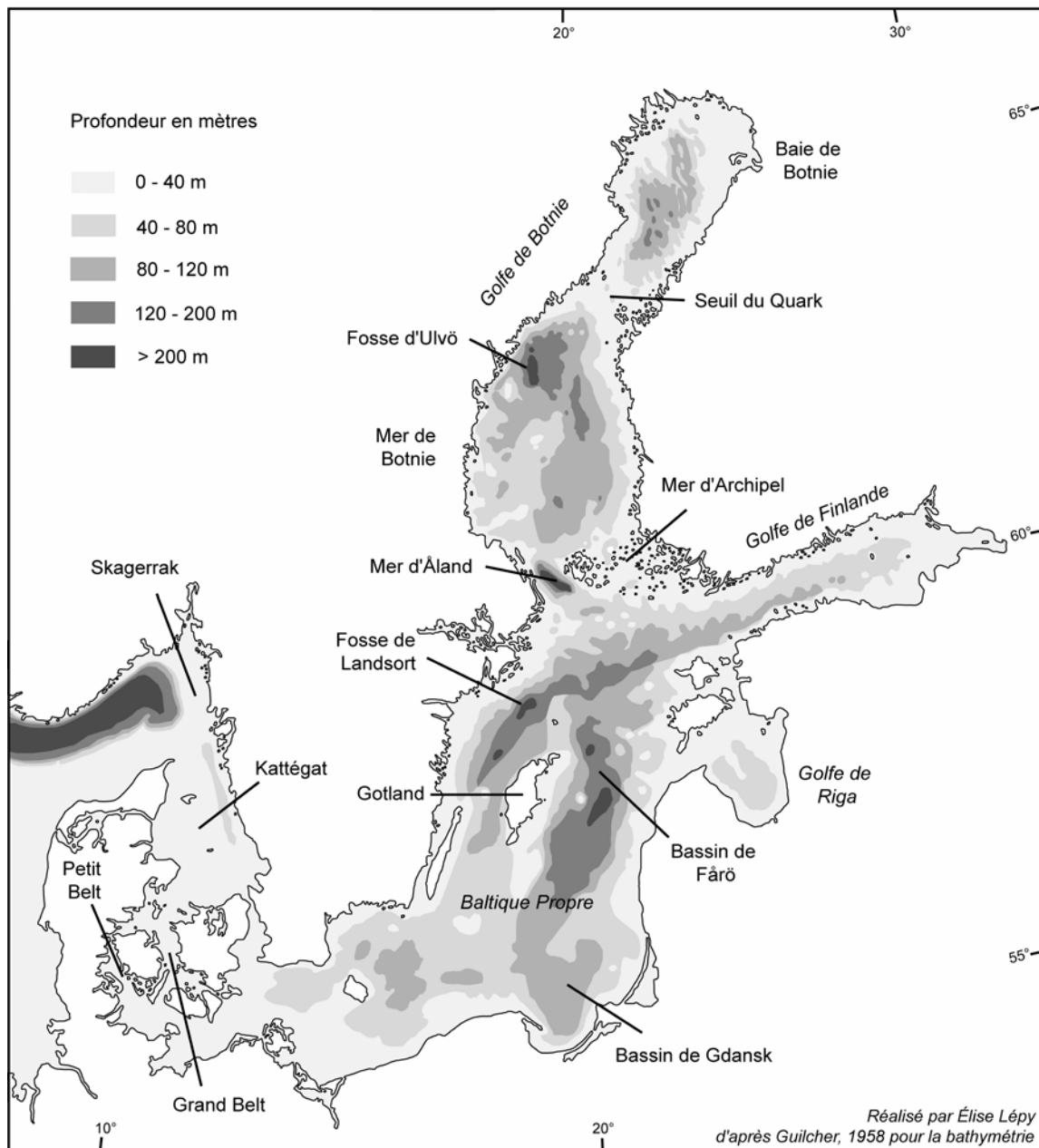
Dans ce chapitre, l'espace marin de la Baltique apparaît aussi fréquenté par les activités humaines qui doivent s'adapter à la présence de glaces flottantes en hiver.

2.1 – LE CADRE GEOMORPHOLOGIQUE ET L'EVOLUTION GEOLOGIQUE DE LA MER BALTIQUE

2.1.1 – Le relief sous-marin de la Mer Baltique

La Mer Baltique et ses golfes occupent une dépression complexe appartenant à la plateforme continentale est-européenne. D'une superficie de 415 000 kilomètres carrés (incluant le Kattégat), et bien qu'elle soit une mer peu profonde (54 mètres en moyenne), la morphologie de ses fonds marins est très accidentée (Stålnacke, 1996, 13). Il s'agit d'une

succession de bassins juxtaposés remplis majoritairement de sédiments quaternaires (Winterhalter et *al.*, 1981, 69). La carte 3 présente la bathymétrie de la Mer Baltique.



Carte 3 – Le relief de la Mer Baltique
Map 3 – Baltic Sea topography

La Mer Baltique est connectée à la Mer du Nord par les détroits danois dont le Skagerrak, premier passage qui détermine l'entrée des eaux océaniques vers la Baltique, atteint une profondeur de 18 mètres (Mälkki et Tamsalu, 1985, 9). Au Sud-Est du Skagerrak, le Kattégat forme un vestibule peu profond (20 mètres) du côté danois, mais qui l'est davantage du côté suédois (jusqu'à plus de 80 mètres). La Mer des Belts est

constituée de sillons étroits et profonds dans les détroits danois formés du Grand Belt (jusqu'à 58 mètres de profondeur) et du Petit Belt (jusqu'à 81 mètres) (Guilcher, 1958, 14).

Les plus profondes dépressions se localisent dans la Baltique Propre qui comportent un grand nombre de bancs et de dépressions. Au Sud, le bassin de Gdansk plonge à plus de 100 mètres ; au Nord-Ouest de l'île de Gotland, le bassin de Landsort à 459 mètres ; et à l'Est de cette même île, le bassin de Fårö à plus de 200 mètres. Le Golfe de Finlande est la continuité de la Baltique propre sans dépressions particulières. Le Golfe de Riga, isolé par un banc et quelques îles n'excède pas 50 mètres de profondeur.

Au Nord de la Baltique Propre, le seuil d'Åland de 30-40 mètres de profondeur sépare la Mer d'Åland, la Mer d'Archipel et le Golfe de Botnie des bassins méridionaux. À l'Ouest de ce seuil, une fosse de plus de 300 mètres de profondeur existe dans la Mer d'Åland (Mälkki et Tamsalu, 1985, 9). Le Golfe de Botnie est constitué de deux dépressions dont la pente est plus forte du côté suédois que du côté finlandais : la Mer de Botnie au Sud et la Baie de Botnie au Nord séparées par le seuil du Quark. La Mer de Botnie compte l'une des plus grandes fosses de la Baltique située au Nord-Ouest : la fosse d'Ulvö d'une profondeur de 294 mètres. La Baie de Botnie est, quant à elle, accidentée de crêtes et de sillons orientés Nord-Nord-Ouest – Sud-Sud-Est (Guilcher, 1958, 14). Le tableau 2 résume les caractéristiques physiques des différents bassins de la Mer Baltique.

Bassin	Superficie (km ²)	Volume (km ³)	Profondeur maximale (m)	Profondeur moyenne (m)
Baltique Propre	209 200	13 600	459	67
Golfe de Riga	18 100	410	51	28
Golfe de Finlande	29 600	1 130	123	38
Mer d'Åland	5 200	410	301	77
Mer d'Archipel	8 300	200	104	23
Golfe de Botnie	103 600	5 830	294	
Mer de Botnie	66 000	4 340	294	68
Baie de Botnie	36 800	1 490	147	43
Mer Baltique	374 000	21 580	459	60

Sources : Winterhalter et al., 1981

Tableau 2 – Caractéristiques des différents bassins de la Mer Baltique (à l'exception des détroits danois)
 Table 2 – Characteristics of various basins of the Baltic Sea (except the Danish Straits)

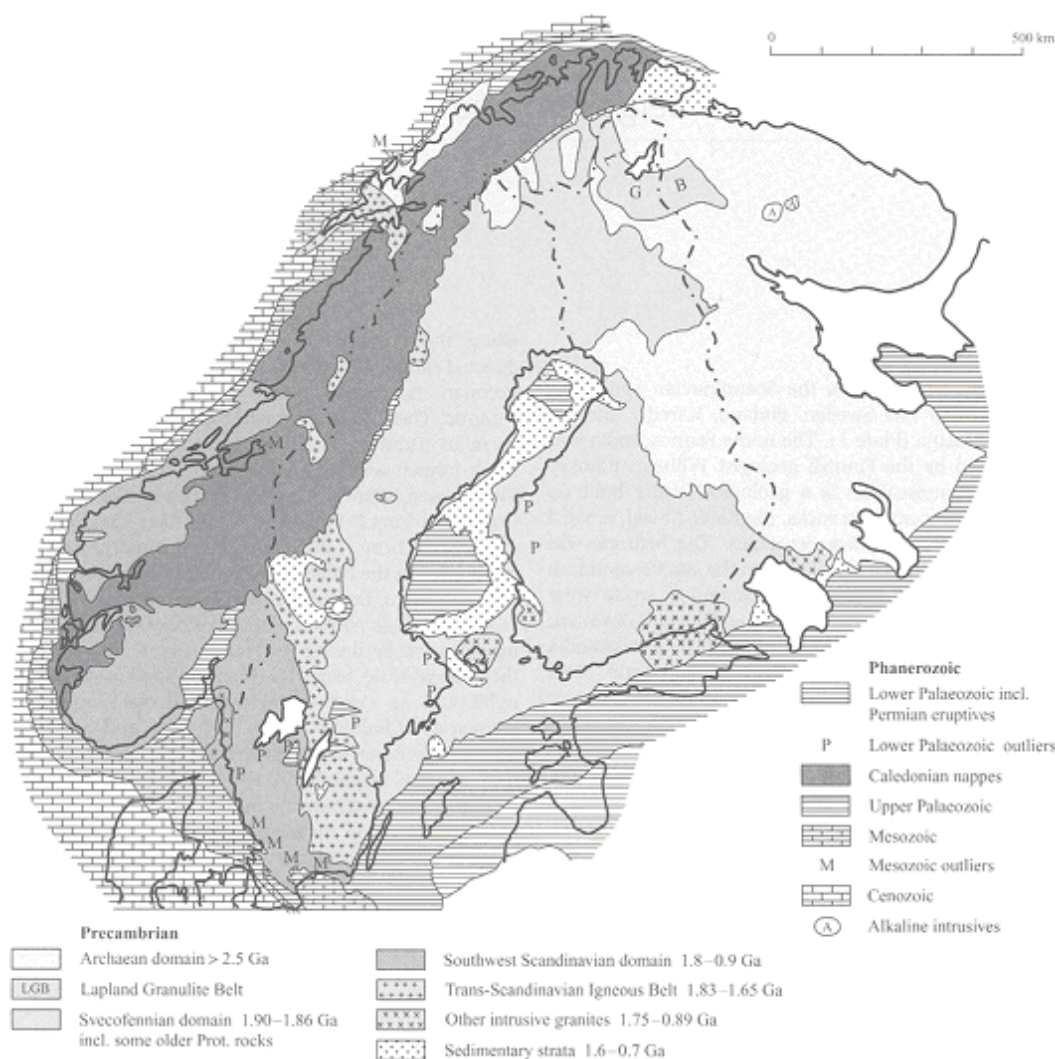
2.1.2 - L'évolution géologique de la Mer Baltique

Dans leur étude de géologie de la Mer Baltique, Boris Winterhalter et al. (1981) montrent que le fond de la Baltique est exposé à deux ensembles géologiques distincts. Au Nord (Golfe de Botnie, parties septentrionales de la Baltique Propre et du Golfe de Finlande), un socle cristallin remontant au Précambrien prolonge essentiellement celui des

côtes Ouest, Nord et Est de la Baltique, alors que le Sud de la Baltique appartient au grand complexe sédimentaire est-européen (carte 4).

La Finlande, la Suède, et le Sud de la Norvège appartiennent au bouclier antécambrien baltique ou fennoscandien (Guilcher, 1958, 14) où prédominent des roches intrusives et cristallines, des roches métamorphiques comme le gneiss, et des grès durs ... (Camena d'Almeida, 1932, 4), appartenant aux domaines archéen (presqu'île de Kola et Carélie), svecofennien (pourtour du bassin de Botnie), scandinavian sud (Sud de la Suède et de la Norvège) et à la ceinture trans-scandinavienne (Suède méridionale). Des couches sédimentaires du Protérozoïque occupent une bonne partie du Golfe de Botnie (Lidmar-Bergström et Näslund, 2005, 4). Ainsi, « *les côtes de Finlande, surtout celle du midi, sont bordées d'une ceinture de rochers innombrables, peu élevées au-dessus du niveau de la mer [...]* Diverses variétés de granite et de calcaire composent ces récifs » (Malte-Brun, 1833, 173). Le littoral du Golfe de Botnie et la rive Nord du Golfe de Finlande, de Turku à la frontière finno-russe sont longés par des ceintures d'écueils avec des modelés plus ou moins accentués. Ces archipels prennent le nom de « skärgård » en suédois qui signifie littéralement « jardin d'écueils » et de « saaristo » en finnois (Frisén et *al.*, 2005, 267). Ils résultent de l'érosion du socle Précambrien composé de granite et de roches métamorphiques, par les glaciations du Pléistocène. Par la suite, l'effet du soulèvement glacio-isostatique et de la sédimentation des baies a favorisé la remontée à la surface de ces chapelets d'îles. Le plus important skärgård de la Mer Baltique est celui d'Åland (Mer d'Archipel) à l'entrée du Golfe de Botnie.

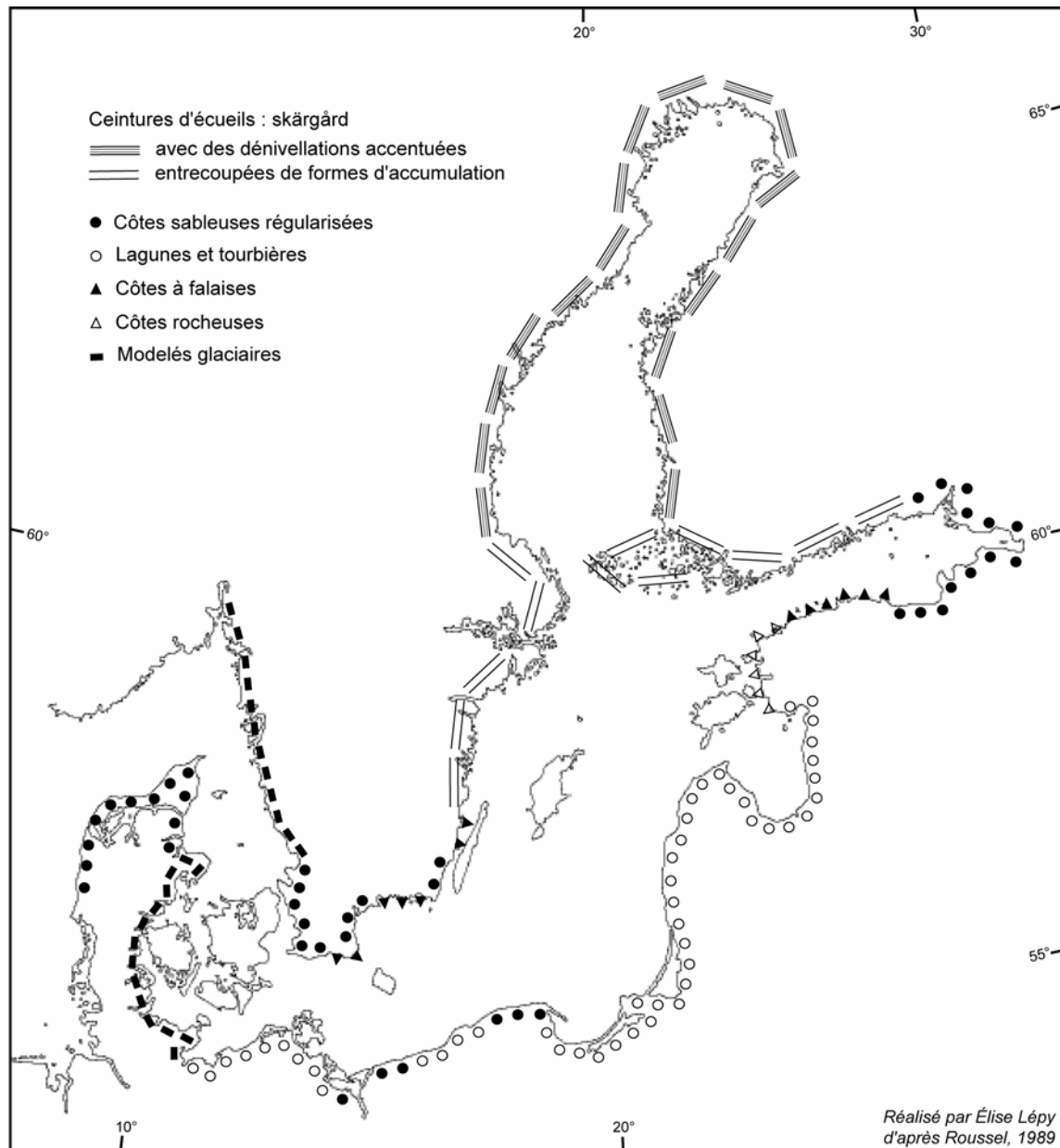
En revanche, dans la partie méridionale de la Baltique, affleurent les formations sédimentaires précocement identifiées : « *Le fond du Golfe de Finlande est une roche calcaire, tantôt compacte et tantôt remplie de coquilles [...]* ; les roches calcaires se montrent à jour dans les îles du Golfe de Riga et celui de Finlande, et elles rejoignent probablement celles de Gotland au milieu de la Baltique et celles de la Finlande méridionale » (Malte-Brun, 1833, 198, 222). Ainsi, le tracé et la physionomie des côtes méridionales de la Baltique forment un littoral moins découpé. La rive Sud du Golfe de Finlande est d'ailleurs formée d'une côte sableuse régularisée jusqu'à l'Estonie. « *Avec la côte occidentale de l'Esthonie et celle du Golfe de Riga, c'en est fini des falaises et des criques jusqu'au delà de l'embouchure de la Daugava [...]*. Les sables constituent sur presque toute leur étendue les côtes lettones et lithuaniennes » (Camena d'Almeida, 1932, 20) : le Golfe de Riga est principalement bordé de lagunes et de tourbières. En revanche, les côtes de la Suède méridionale et des détroits sont constitués de roches sédimentaires, de formes plus rigides (Chabot, 1958). La carte 5 indique les différentes formes de relief présentes sur les côtes de la Baltique.



Source : Lidmar-Berström et Näslund, 2005

Carte 4 – Géologie de la Fennoscandie
Map 4 – Geology of Fennoscandia

L'évolution des côtes actuelles de la Mer Baltique résulte de la disparition du dernier grand glacier continental pléistocène fennoscandien. En effet, le domaine baltique a subi l'action de multiples grandes glaciations durant le Pléistocène et sa cuvette a été sujette à l'érosion glaciaire. La dernière grande déglaciation a débuté il y a 15 000 ans B.P à la fin du Weichsélien au moment où le glacier continental recouvrant la Fennoscandie d'une épaisseur maximale de 2,75 km (Siegert et *al.* in Miettinen et *al.*, 2007, 29) atteignait les marges Sud de la Baltique actuelle (Winterhalter et *al.*, 1981, 55). Le recul de l'inlandsis a permis l'existence de mers et lacs ancêtres de la Baltique actuelle (figure 5) : le lac Baltic Ice à 12 000 ans B.P, la mer de Yoldia à 10 000 ans à B.P, la lac Ancylus à 9 000 ans B.P, la mer de Littorina à 7 000 ans B.P (Guilcher, 1958 ; Tikkanen, Oksanen, 2002). En se retirant, le glacier a laissé « son empreinte, rabotant ou excavant certaines parties, accumulant en d'autres des dépôts morainiques d'une épaisseur parfois considérable » (Camena d'Almeida, 1932, 17).



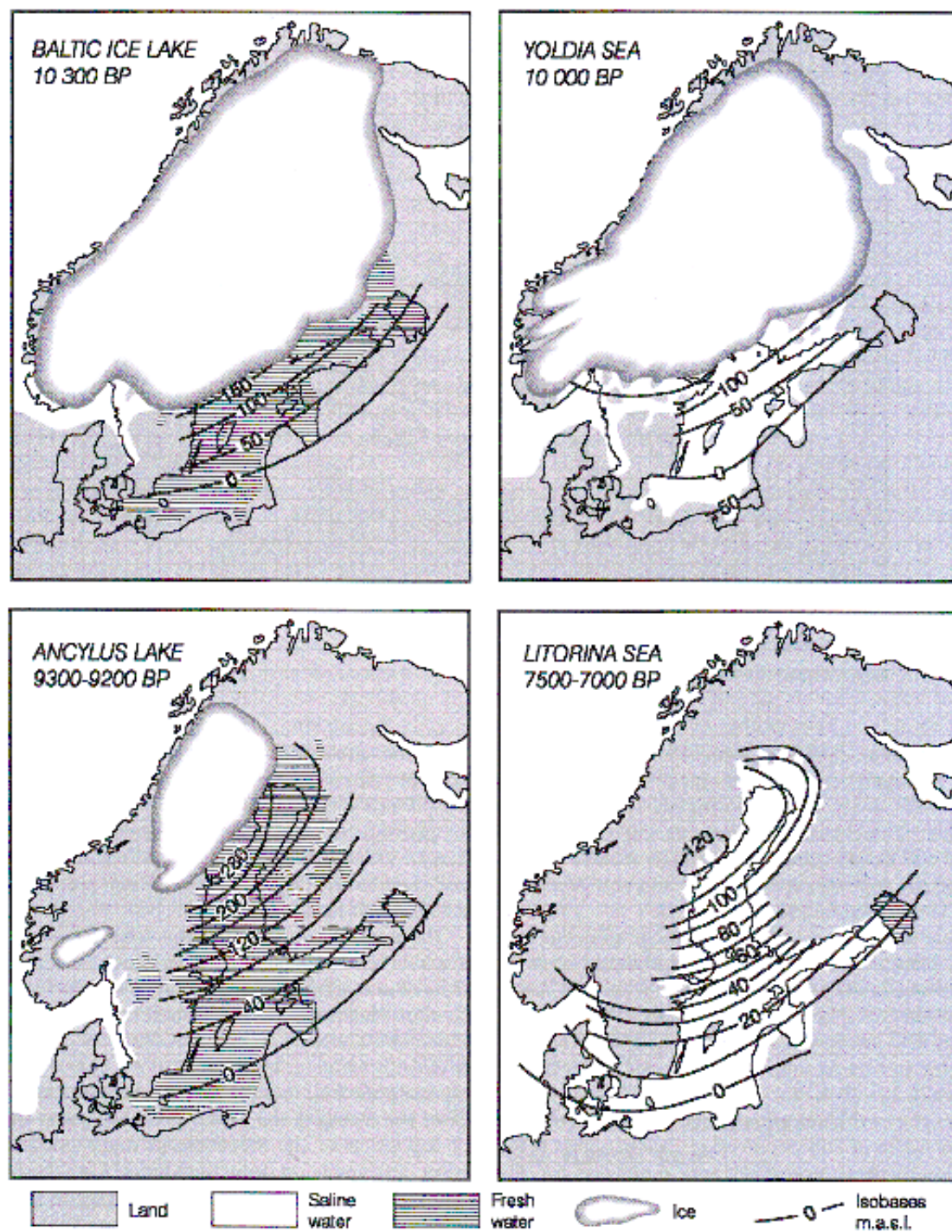
Carte 5 – Les formes de relief des côtes de la Baltique
 Map 5 – Coastal landforms of the Baltic Sea

L'évolution de la Mer Baltique après cette dernière grande déglaciation a été et est gouvernée majoritairement par les phénomènes glacio-isostasiques qui lui sont liés. Ainsi le rebond glacio-isostasique causé vers le Sud par la masse du glacier continental, est en partie responsable de l'évolution du trait de côte de la Baltique : ce phénomène a eu pour effet de réduire la surface marine pendant plusieurs milliers d'années et a d'abord augmenté la superficie des terres émergées (Tikkanen et Oksanen, 2002, 9). Ainsi, la carte d'Ekman (carte 6) concernant la localisation du récent rebond postglaciaire en Fennoscandie a été établie à partir des enregistrements du niveau de la mer et des lacs autour de la Mer Baltique : les courbes représentent la vitesse relative du soulèvement de

la croûte par rapport au niveau moyen de la mer sur la période séculaire 1892-1991 (Ekman et Mäkinen, 1996, 229). Il apparaît que des mouvements glacio-isostasiques positifs importants se produisent toujours dans le Nord de la Baltique, en Baie de Botnie, avec un taux maximum de 9 mm / an alors que des mouvements de subsidence se font ressentir dans le Sud avec - 1 mm / an (Staudt et *al.*, 2004, 196). Il en est de même pour la région d'Oulu qui se soulève à une vitesse moyenne de 7 mm / an. Certains riverains observent même le rehaussement du fond de l'embouchure du cours d'eau Oulujoki, qui sépare de nombreuses îles de la ville d'Oulu. Au large de Virpiniemi (au Nord d'Oulu), il est également possible de voir des bancs de sable remonter à la surface. L'exemple de l'île d'Hailuoto est révélateur du rapide mouvement isostasique puisqu'il y a 200 ans Hailuoto était formée de quatre îles distinctes qui n'en font plus qu'une de nos jours (Alestalo, 1979, 109). En revanche, le fond du Golfe de Riga connaît des mouvements quasi nuls.

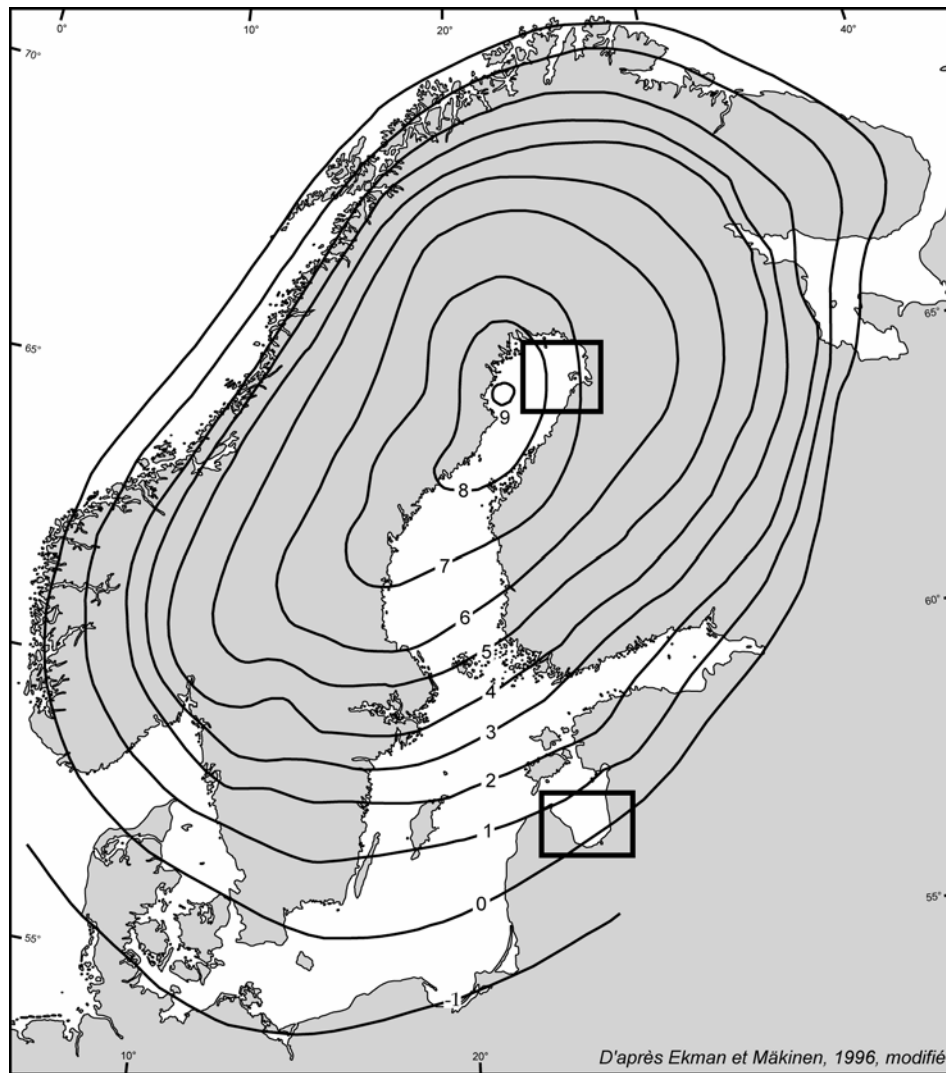
L'intérêt scientifique pour ces mouvements verticaux de l'écorce terrestre est ancien. Ainsi Élisée Reclus (1885, 320) relatait que « *depuis 1697, époque à laquelle des marques ont été faites sur les roches de Wasa, l'exhaussement est évalué en cet endroit de 1 mètre à 1 mètre 16 par 100 années ; devant Åbo, et pour tout le golfe de Finlande, il est de 60 centimètres par siècle* ». Au début du XX^{ème} siècle, P. Camena d'Almeida (1932, 8) observait qu' « *au bord du golfe de Botnie, l'exhaussement du rivage aurait été d'environ 1 mètre depuis un siècle ; il aurait atteint 45 à 60 centimètres sur le littoral du Sud-Ouest* ». Il précise également que l'apparition de hauts-fonds dans diverses baies et des difficultés à l'entrée des ports du golfe de Botnie ont été signalées. Enfin, Maurice Zimmermann (1933, 68) chiffre la montée des terres dans le Norrland central (région de la côte Ouest du Golfe de Botnie) à 1 mètre 50 par siècle.

Les prévisions géophysiques actuelles indiquent que le soulèvement glacio-isostasique continuera encore plusieurs milliers d'années (Eronen, 2005, 32) à une vitesse réduite (Ekman et Mäkinen, 1996) mais qui pourrait avoir comme conséquence la fermeture de la Baie de Botnie au niveau du Quark. D'ici deux milliers d'années la partie septentrionale du Golfe de Botnie pourrait devenir un lac... (Tikkanen et Oksanen, 2002, 18).



Source : Eronen, 2005

Figure 5 - Les quatre grandes phases de la Mer Baltique à la fin du Weichsélien
Figure 5 - The four phases of the Baltic Sea since the end of Weichselian



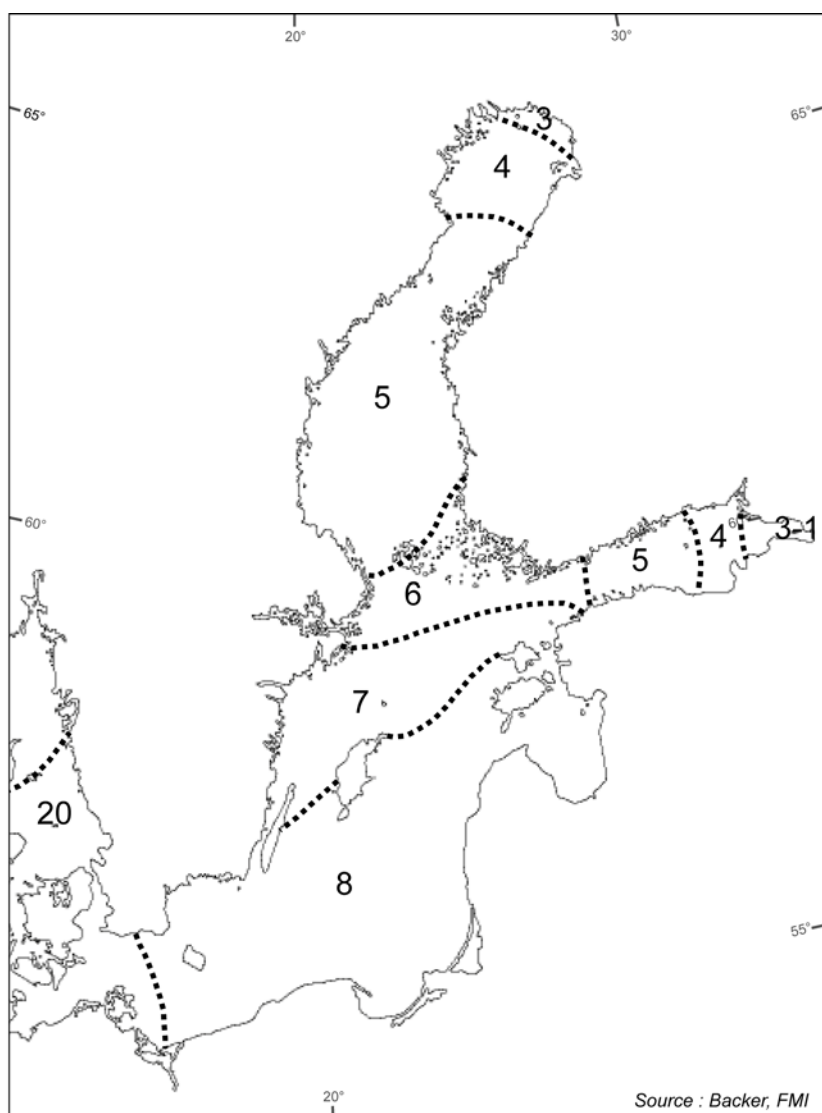
Carte 6 – Le récent rebond glacio-isostasique en Fennoscandie en mm/an et les deux terrains d'étude
 Map 6 – The recent glacio-isostatic rebound in Fennoscandia in mm/year and the two study area

2.2 – LE BASSIN-VERSANT DE LA BALTIQUE ET SON HYDROLOGIE

Comme beaucoup de régions (Amérique du Nord, Sibérie) qui ont connu de récentes déglaciations, la Fennoscandie est caractérisée par une abondance de lacs, spécificité commune aux paysages de socles post-glaciaires. Elle alimente ainsi la Mer Baltique par ses nombreux cours d'eau qui prennent leurs sources dans la chaîne des Scandes à l'Ouest et au Nord, et qui déversent l'eau douce des lacs de Finlande en traversant des reliefs vallonnés puis les plaines littorales du Golfe de Botnie, à l'Est. Par ailleurs la Baltique méridionale sédimentaire reçoit l'apport d'eau douce de grands fleuves, peu nombreux mais hydrologiquement très importants, qui traversent majoritairement les grandes plaines d'Europe de l'Est avant de s'écouler dans les Golfs de Finlande et de Riga et dans la Baltique Propre (carte 8).

Ainsi, et de manière un peu paradoxale, la Mer Baltique est souvent considérée comme le plus vaste bassin d'eau douce de la planète. Brassant en effet un volume d'eau équivalent à 21 600 km³ (Stålnacke, 1996, 13), la Baltique (carte 7) offre un taux de salinité bas dès sa partie occidentale (10 – 13 ‰ en Baltique Propre) voire insignifiant dans les parties internes des Golfes de Botnie (3 – 7 ‰) et de Finlande (5 – 9 ‰) (Kullenberg, 1981, 135). Outre les conditions topographiques non favorables à la circulation de la salinité, les détroits danois forment l'unique passage permettant un mélange des eaux entre la Mer du Nord et la Mer Baltique. Or la faible profondeur de la dépression du Kattegat et du Skagerrak ne permet qu'une circulation des eaux relativement faible : 950 km³ / an d'eau se dirigent vers l'Océan Atlantique et 475 km³ / an d'eau salée entrent dans la Baltique (Wulff and Stigebrandt *in* Stålnacke, 1996, 13). D'après ces auteurs, l'eau résiderait en moyenne 25 ans dans la Mer Baltique.

Ce grand bassin d'eau quasi-douce et semi-fermé est principalement alimenté par les cours d'eau qui s'y jettent. Le bassin-versant de la Baltique couvre en effet une surface 4,3 fois plus grande que la mer elle-même (Ehlin, 1981, 123) soit une superficie équivalente à 1 745 136 km² (Stålnacke, 1996, 13) (tableau 3). Chaque sous-bassin hydrographique de la Mer Baltique offre des conditions géographiques naturelles (climat, géologie, végétation) variées qui influent sur l'écoulement de ses cours d'eau. Ces derniers ont ainsi des régimes hydrographiques bien différents (Hyvärinen et Kajander, 2005, 149). Au Nord, les cours d'eau sont majoritairement alimentés par les glaciers des Scandes et par l'épaisse couverture neigeuse (régime glacio-nival) qui disparaît à la fin du mois de mai ; le ruissellement des cours d'eau vers la Baie de Botnie atteint donc son maximum en juin. À l'Est, les lacs finlandais connaissent, quant à eux, une débâcle de leurs eaux vers la fin du mois d'avril voire le début du mois de mai qui permet d'importantes crues printanières jusqu'au début de l'été vers le Golfe de Finlande (régime de transition). Alors qu'au Sud, l'englacement des cours d'eau et des lacs se produit dans une moindre mesure d'où une décharge fluviale dans le Golfe de Riga qui atteint son maximum en avril (régime baltique) (Mälikki et Tamsalu, 1985, 19).



Carte 7 – Salinité (‰) dans la Mer Baltique
 Map 7 – Salinity (‰) in the Baltic Sea

Bassin hydrographique	Baie de Botnie	Mer de Botnie	Mer Archipelago	Golfe de Finlande	Golfe de riga	Baltique Propre	Kattegat et Belt	Total
km ²	260 675	220 765	9 000	412 900	128 340	596 985	91 605	1720
								270

Sources : HelCom

Tableau 3 – Superficie des sous-bassins hydrographiques de la Mer Baltique
 Table 3 – Hydrological sub-basin areas of the Baltic Sea

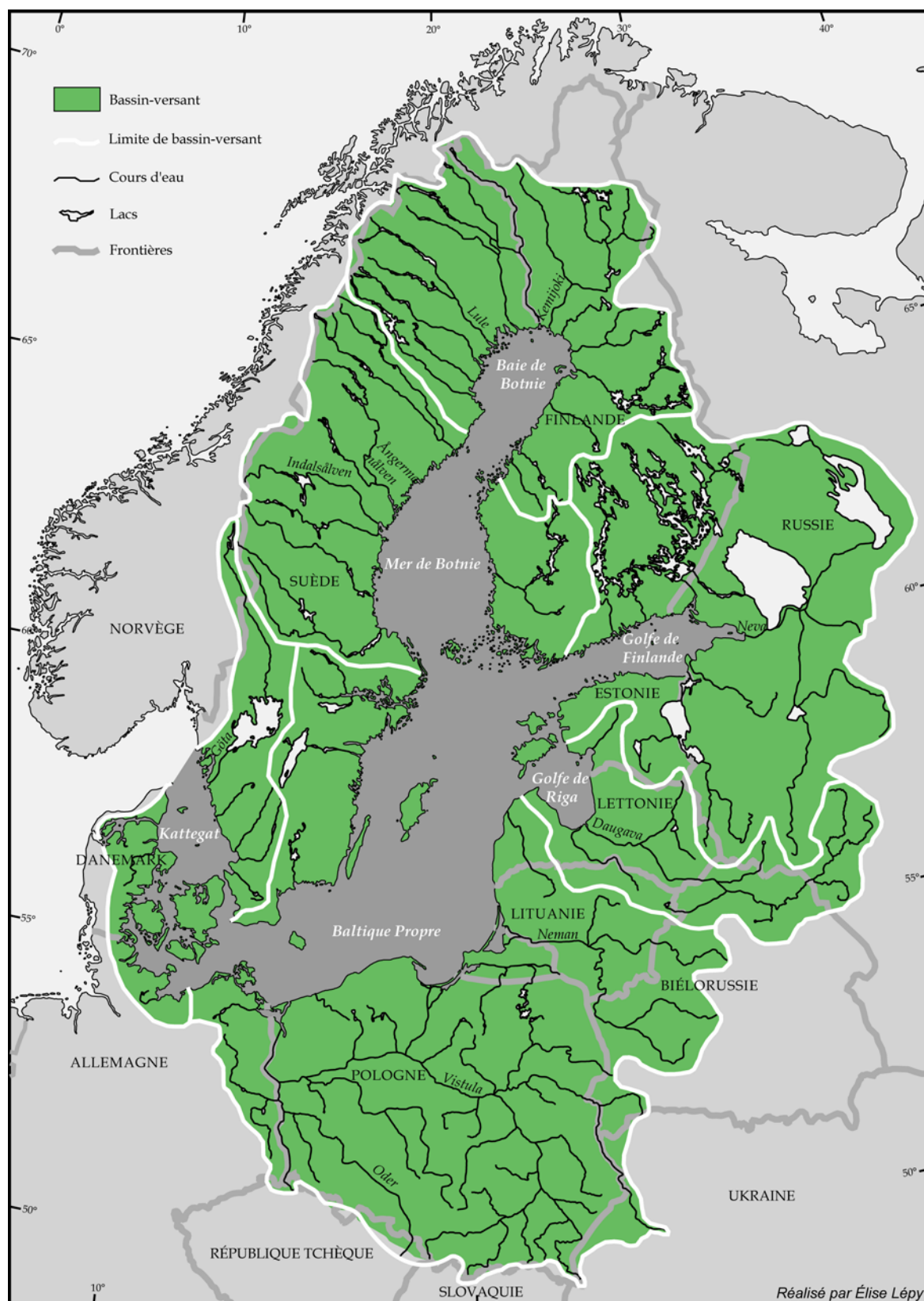
Le Golfe de Botnie enregistre ainsi le plus important ruissellement moyen annuel de la Baltique avec 183 km³/an alors que ceux des Golfs de Finlande et de Riga, et de la Baltique Propre sont estimés respectivement à 114, 29 et 110 (Mälkki et Tamsalu, 1985, 19). Cependant, les plus grands fleuves qui se jettent dans la Mer Baltique (tableau 4) sont la Neva (2600 m³/s) dans le Golfe de Finlande et la Vistule (954 m³/s) dans la Baltique Propre (Ehlin, 1981, 125). D'autre part, il semble opportun de préciser que les bassins-versants des dix plus importants cours d'eau (Neva, Vistule, Daugava, Neman, Oder, Kemijoki, Göta, Ångermanälven, Lule, Indalsälven) contribuent pour 52% à l'apport d'eau douce en Mer Baltique, et que les cinq plus grand fleuves du continent européen appartiennent à son bassin hydrographique (Stålnacke, 1996, 13).

On conçoit déjà l'importance de cette faible salinité des eaux sur la prise en glace de la Mer Baltique qui gèle, bien entendu, plus vite que les autres mers « salées » des mêmes latitudes.

Sous-bassin hydrographique	Cours d'eau	Bassin-versant (km ²)	Débit moyen annuel (m ³ / s)	Débit spécifique (L / s / km ²)
<i>Kattegat</i>				
	Göta	50 180	580	12
<i>Baltique Propre</i>				
	Vistule	193 910	954	4,92
	Neman	98 200	674	6,86
	Norrström	22 630	166	7
<i>Golfe de Botnie</i>				
	Tornionjoki	58 240	650	11
	Kemijoki	51 127	550	11
	Ångermanälven	31 865	500	16
	Indalsälven	26 720	460	17
	Luleälven	25 245	510	20
	Oulujoki	22 841	260	11
<i>Golfe de Finlande</i>				
	Neva	281 100	2 600	9,25
	Kymijoki	37 159	310	8
<i>Golfe de Riga</i>				
	Daugava	87 900	688	7,83

Sources : Hyvärinen et Kajander, 2005 pour les cours d'eau de la Fennoscandie ; Ehlin, 1981 pour les cours d'eau de la Baltique Sud

Tableau 4 – Bassin-versants, débits et débits spécifiques des plus importants cours d'eau du bassin hydrographique de la Mer Baltique
 Table 4 – Watersheds, flows and specific discharges of the biggest watercourses of the hydrological basin of the Baltic Sea



Carte 8 – Bassin hydrographique de la Mer Baltique
 Map 8 – Hydrological basin of the Baltic Sea

À tout cela, il est indispensable de souligner la part importante de l'Homme dans la gestion des cours d'eau et donc de son impact sur l'écoulement fluvial (carte 20, chapitre 4). La Fennoscandie, en particulier, dénombre une multitude de barrages hydroélectriques produisant 50% de l'électricité en Suède et 20% en Finlande (Hyvärinen et Kajander, 2005, 149). Ces centrales hydroélectriques ont un important rôle de régulation lors des crues printanières et sont susceptibles de modifier les conditions d'embâcle et de débâcle des eaux fluviales. Nombre de ces installations se décomptent dans le bassin hydrographique du Golfe de Botnie. À titre d'exemple, la rivière Oulujoki ne compte pas moins de huit centrales hydroélectriques, toutes construites dans les années 50 et installées sur plus de 250 km en amont du lac Oulujärvi. Leur puissance maximale varie de 39 à 129 MW, soit une puissance installée de 455 MW le long du cours d'eau Oulujoki. L'installation de ces ouvrages a modifié le débit du cours d'eau ainsi que le comportement de ses glaces. En effet, aux abords d'un ouvrage hydraulique la température de l'eau varie largement : en amont de l'ouvrage, l'eau stagne dans le bassin d'alimentation, cette situation favorise alors un gel prématuré en automne et un retard de la débâcle au printemps ; en revanche en aval de l'ouvrage, l'eau est réchauffée. Au printemps, cette eau plus chaude accélère la fonte des glaces et peut provoquer des embâcles en aval là où la glace n'est pas encore fondue formant des obstacles dus à l'accumulation des glaces charriées par le cours d'eau. Les caractéristiques glacielles du cours d'eau maîtrisé par les centrales hydroélectriques ont ainsi des répercussions évidentes sur le comportement des glaces marines proches de son embouchure.

2.3 - LE CLIMAT DE LA MER BALTIQUE

La situation géographique de la Mer Baltique, à l'Est de l'Atlantique Nord et à l'abri des Alpes scandinaves et à l'Ouest du continent eurasiatique y explique la diversité des combinaisons climatiques.

2.3.1 - Les principales données climatiques de l'Europe du Nord

« Le climat de l'Europe du NW et du N est caractérisé avant tout par une anomalie thermique positive, la plus considérable du monde » (Guilcher, 1958, 62). En effet, bien que les températures soient froides dans le Nord de l'Europe, elles sont considérablement plus favorables que dans d'autres terres de même latitude (Tikkanen, 2005) : ainsi, le mois de janvier est en moyenne plus chaud de 43°C à Trondheim en Norvège qu'à Verkhoïansk en Sibérie (tableau 5).

	Latitude	Température (°C)			Précipitations moyennes annuelles (mm)
		Moyenne	Janvier	Juillet	
Trondheim (Norvège)	63° 25' N	5,4	-3,2	14,4	892
Oulu (Finlande)	65° 00' N	2,4	-9,7	16,2	446
Yellowknife (Territoires du Nord-Ouest, Canada)	62° 27' N	-4,6	-26,8	16,8	280,8
Verkhöïansk (Yakoutie, Russie)	67° 33' N	-15,3	-47	15,2	178

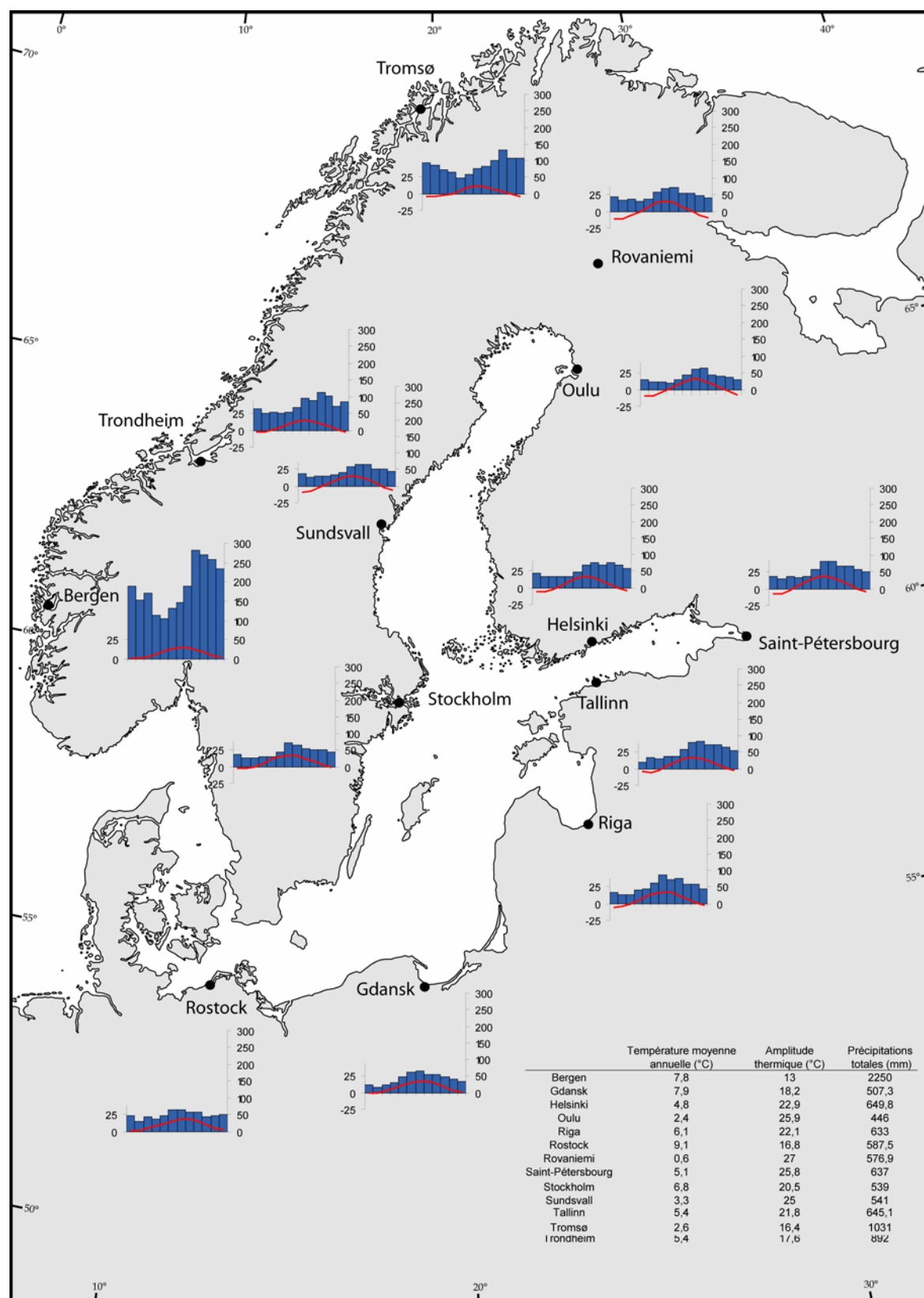
Sources : Trondheim et Yellowknife, OMM ; Oulu, FMI ; Verkhöïansk, Tikkanen, 2005

Tableau 5 – Températures et précipitations de stations à latitude similaire
Table 5 – Temperatures and precipitations of various stations at the same latitude

Le climat de l'Europe du Nord est sous l'influence de la dérive Nord-Atlantique qui prolonge les effets du courant chaud du Gulf Stream vers le Nord-Est de l'Océan en longeant les côtes norvégiennes, et qui adoucit ses températures. Néanmoins, le climat du domaine baltique et plus largement de la Fennoscandie présente des caractères climatiques variés (carte 9).

D'orientation subméridienne, la chaîne montagneuse des Scandes qui culmine à 2 469 mètres d'altitude (Galdhøpiggen), induit en effet des contrastes climatiques importants de part et d'autre de son relief. Elle cantonne en effet le climat océanique sur une bordure continentale étroite, sur son versant norvégien (Planchon, 1997, 87). Ainsi les côtes norvégiennes sont deux fois plus arrosées que la Suède et la Finlande. Il n'est pas rare qu'à certains endroits du Vestland (Ouest de la Norvège), les précipitations tombées surtout en saison hivernale atteignent 5 000 mm (Guilcher, 1958, 71). L'effet asséchant de Foehn joue sur l'autre versant oriental un rôle essentiel dans la distribution pluviométrique de la Fennoscandie. La Suède et la Finlande reçoivent en moyenne 500 mm/an de précipitations avec un minimum se situant sur les côtes suédoises de la Baie de Botnie et en Laponie où elles deviennent véritablement faibles (inférieures à 400 mm/an) : c'est déjà la manifestation d'une véritable continentalité pluviométrique renforcée par un maximum de pluies d'été.

Le rôle cumulé d'abri de la barrière orographique scandinave d'une part et de la dérive Nord-Atlantique d'autre part accentue aussi la différenciation thermique régionale entre l'Ouest et l'Est créée, d'après A. Guilcher (1958, 66), par l'hiver plus que par l'été. En effet, Bergen n'enregistre aucun mois de températures moyennes mensuelles négatives alors que Stockholm en connaît trois, Helsinki et Saint-Pétersbourg quatre, Oulu et Rovaniemi respectivement cinq et six. En revanche, les températures estivales avoisinent en moyenne 16 °C quoique plus fraîches sur les côtes norvégiennes et en Laponie.



Les moyennes mensuelles pour les stations norvégiennes et suédoises : 1961-1990 ; pour la station estonienne : 1961-2000 ; et pour les stations finlandaises, allemandes et polonaises : 1971-2000

Réalisé par Élise Lépy
d'après l'Organisation Météorologique Mondiale et le Finnish Meteorological Institute

Carte 9- Caractères thermiques et pluviométriques de l'Europe du Nord
Map 9 - Temperature and precipitation characteristics in Northern Europe

Les côtes norvégiennes bénéficient ainsi d'un climat à caractère maritime marqué alors que la Suède, la Finlande et les pays baltes ont un climat intermédiaire à caractère nettement plus continental (Tikkanen, 2005, 98) caractérisé par la faiblesse des précipitations et une forte amplitude thermique. Comme le rappellent Jyrki Autio et Olavi Heikkinen (2002, 61), l'amplitude thermique est un bon indicateur de la continentalité d'un climat. Elle est faible dans les espaces océaniques (de 12,95 °C à Bergen) et augmente quand le climat devient plus continental (27 °C à Rovaniemi). De plus, il n'est pas rare d'enregistrer des températures inférieures à -30 °C dans le Nord de la Finlande et de la Suède pendant des hivers sévères. Les mêmes auteurs précisent que la température la plus basse enregistrée en Finlande durant le XX^{ème} siècle, -51,5 °C, a été mesurée à Kittilä (Laponie finlandaise) en 1999.

2.3.2 - Le rôle explicatif de la circulation générale de l'atmosphère en Europe du Nord

On sait que la position au contact de l'océan et du continent et la situation intermédiaire entre les régions tropicales et polaires, favorisent la position de carrefour de l'Europe du Nord et du Nord-Ouest où de multiples masses d'air se rencontrent. A. Guilcher (1958, 76) dénombre cinq types d'origine (arctique, polaire ou tropical) et de cheminement (maritime ou continental) différents.

Dans ce contexte d'ensemble, la Baltique est un domaine disputé principalement par la rencontre des masses d'air maritime polaire (mP) et tropical (mT) et continental polaire (cP) (carte 10). En provenance de la région sud du Groënland, les masses d'air maritime polaire, sont froides et humides. Leur température augmente au fur et à mesure qu'elles se déplacent vers l'Est et le Sud-Est, au contact d'eaux plus chaudes. Il arrive alors que certaines parties de l'air maritime polaire se soient suffisamment échauffées pour acquérir des caractères voisins des masses d'air maritime tropical (*ibid.*, 77). Ces dernières, chaudes et humides, ont une trajectoire Sud-Ouest - Nord-Est, et affectent surtout les Îles Britanniques, la Mer du Nord et la Mer de Norvège. Cependant, cet air pénètre en Mer Baltique et il est un agent de transfert capital de la chaleur des eaux de l'Atlantique vers l'Europe du Nord. La rencontre de l'air maritime polaire et de l'air maritime tropical se fait le long du front polaire où circulent de nombreuses perturbations de direction Ouest-Est. Ainsi le front polaire s'établit avec vigueur sur l'Europe du Nord. En revanche à l'Est de la Mer Baltique, l'air continental polaire (cP) a une forte action pendant la saison froide durant laquelle il constitue une masse froide et sèche anticyclonale stabilisée sur la Russie. En hiver, l'air continental polaire constitue un anticyclone thermique qui s'étend fréquemment jusqu'en Europe Centrale.

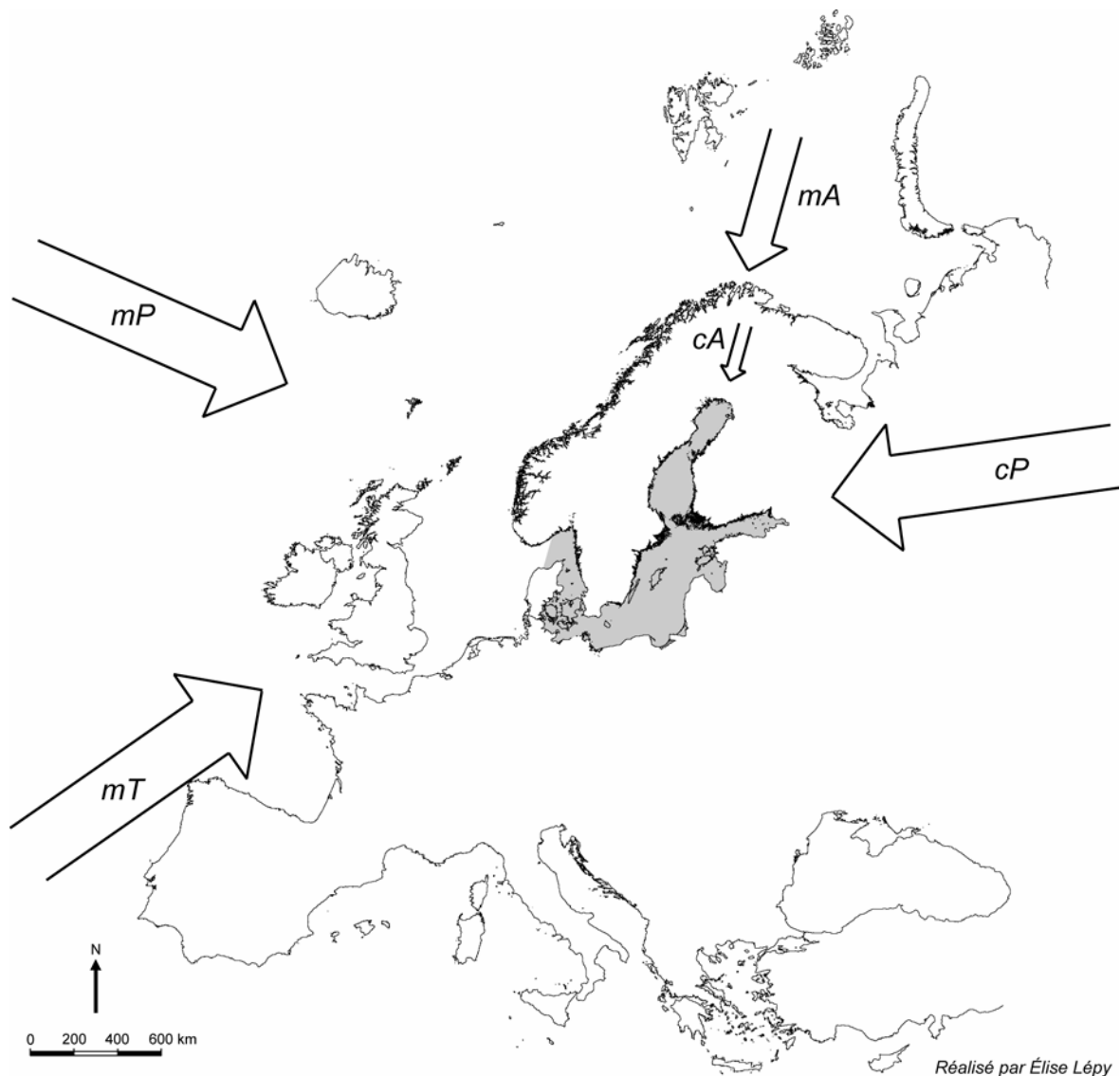
Cependant la Baltique subit également l'influence de l'air arctique évidemment très froid. Se formant sur le bassin polaire arctique, l'air maritime arctique (mA) est plus froid et plus sec que l'air maritime polaire dont il est séparé par le front arctique. En fin

d'hiver et au printemps, ces masses d'air se déversent vers le Sud, expliquant partiellement les caractères thermiques et pluviométriques des mois de février à mai froids et neigeux en Scandinavie et en Finlande. Par ailleurs les masses d'air continental arctique (cA), se forment à partir de l'automne en Laponie, par accumulation d'air froid autochtone par rayonnement sur terre enneigée. En hiver, l'air continental arctique reçoit des advections d'air maritime arctique du Nord et du Nord-Est, et d'air continental polaire de l'Est. À la fin du mois de janvier, l'épaisseur de l'air continental arctique s'est fortement accrue, et empiète sur la chaîne scandinave et vers le Golfe de Botnie, où il entre en conflit avec l'air maritime polaire.

Les latitudes moyennes sont donc le siège de transferts d'énergie où prédominent des échanges à caractère advectif. L'Europe du Nord est affectée principalement par deux zones : la dépression d'Islande, centre d'action majeur de l'hémisphère Nord, et l'anticyclone des Açores. En hiver, les situations anticycloniques sont très fréquentes car la mer plus ou moins prise en glace est plus froide que l'air : il y a en sorte un véritable effet de continentalisation de l'espace marin, en particulier au Nord de la Baltique. Ainsi, les anticyclones thermiques prennent leur importance à la fin de l'hiver et au printemps. Au contraire, l'été connaît de nombreuses précipitations liées aux perturbations frontales. Ainsi, la dépression dite polaire glisse vers le Sud et se situe très fréquemment sur la Mer de Norvège. Elle dirige le flux perturbé qui circule au Nord de l'anticyclone des Açores. Ce flux perturbé atlantique et les basses pressions continentales font qu'en été ce sont les dépressions qui l'emportent au-dessus de la Baltique, alors que les anticyclones dominent en hiver qui connaît un adoucissement thermique dû aux eaux océaniques chaudes (Roussel, 1987). C'est à l'automne que de grandes tempêtes sont imposées par la puissance de la circulation méridienne. En effet, la Mer Baltique est alors un fort réservoir de chaleur, d'autant que le continent commence à se refroidir. Après l'été, les tendances dépressionnaires demeurent, et des advections froides de la circulation de Nord surgissent créant de belles tempêtes dans la Baltique Propre et dans le Golfe de Finlande (Pagney, 1989).

2.3.3 – Les régions climatiques de la Mer Baltique

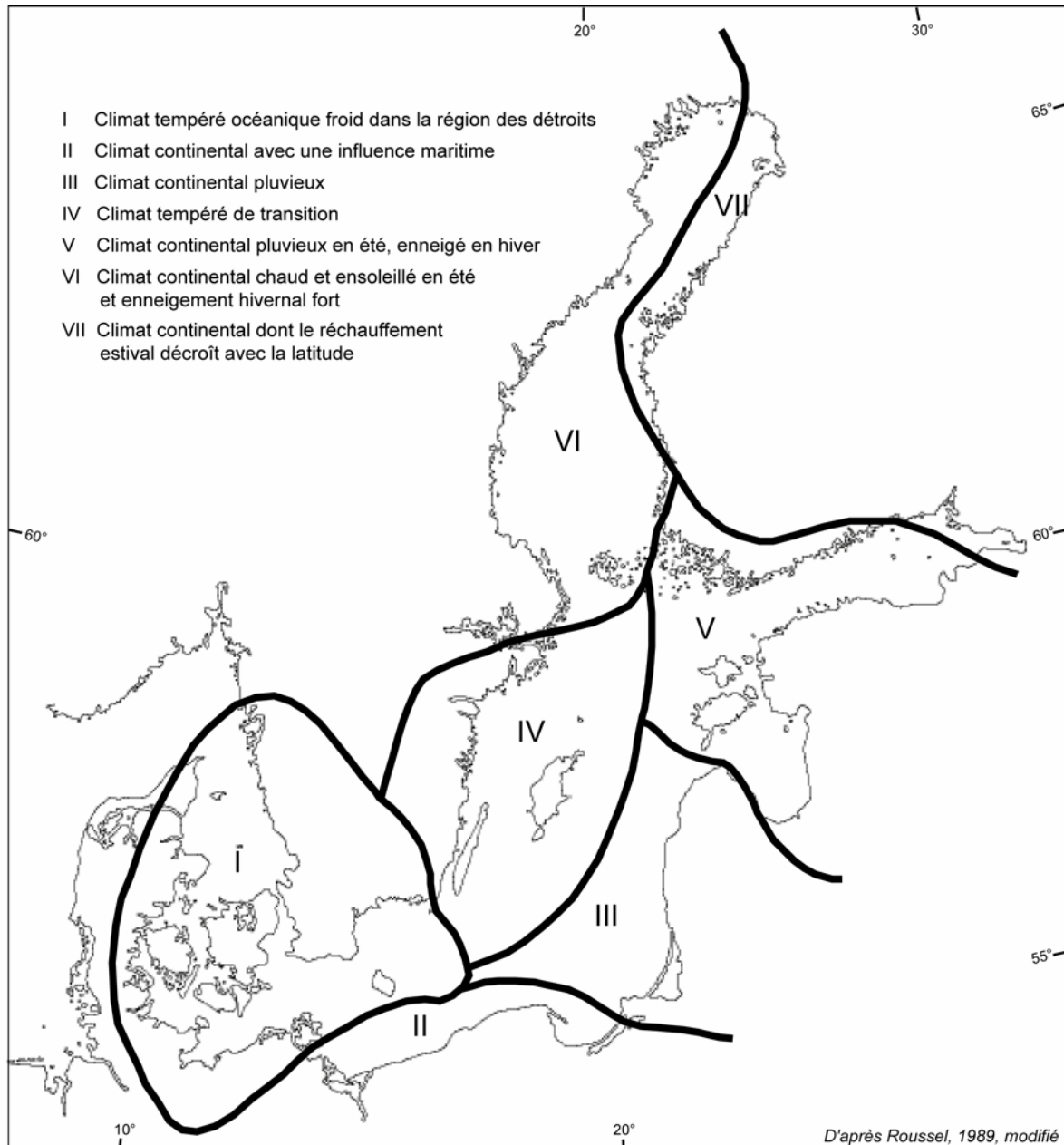
La Mer Baltique est ainsi un carrefour d'influences climatiques différentes, « *une mosaïque de différentes régions climatiques plus qu'un ensemble homogène* » (Roussel, 1987, 521). L'auteur définit six ambiances climatiques régionales issues du croisement entre régions thermiques et régions pluviométriques (carte 11).



Carte 10 – Les masses d’air affectant le climat de la Mer Baltique
 Map 10 – Air masses affecting the Baltic Sea climate

Ainsi d’après I. Roussel, la région des détroits danois subit un climat tempéré océanique froid : les pluies sont abondantes, les précipitations neigeuses faibles et la douceur de l’hiver est limitée par des vagues de froid qui permettent toutefois le gel de la Mer des Belts. Les littoraux allemands et polonais appartiennent au domaine continental de transition de l’Europe Centrale nuancé par la proximité de la mer : son gel allonge l’hiver pour laisser place à un été chaud et pluvieux. Les côtes de Lituanie et de l’Oblast de Kaliningrad forment la troisième région climatique. Il s’agit d’un climat continental pluvieux dont la rigueur hivernale est atténuée par la présence de la mer souvent libre de glace. Au rivage opposé, la côte suédoise présente un climat tempéré de transition plus doux et plus sec que le précédent avec un pic de précipitations en hiver. Le Golfe de Finlande et la partie Ouest du Golfe de Botnie subissent un climat continental froid et

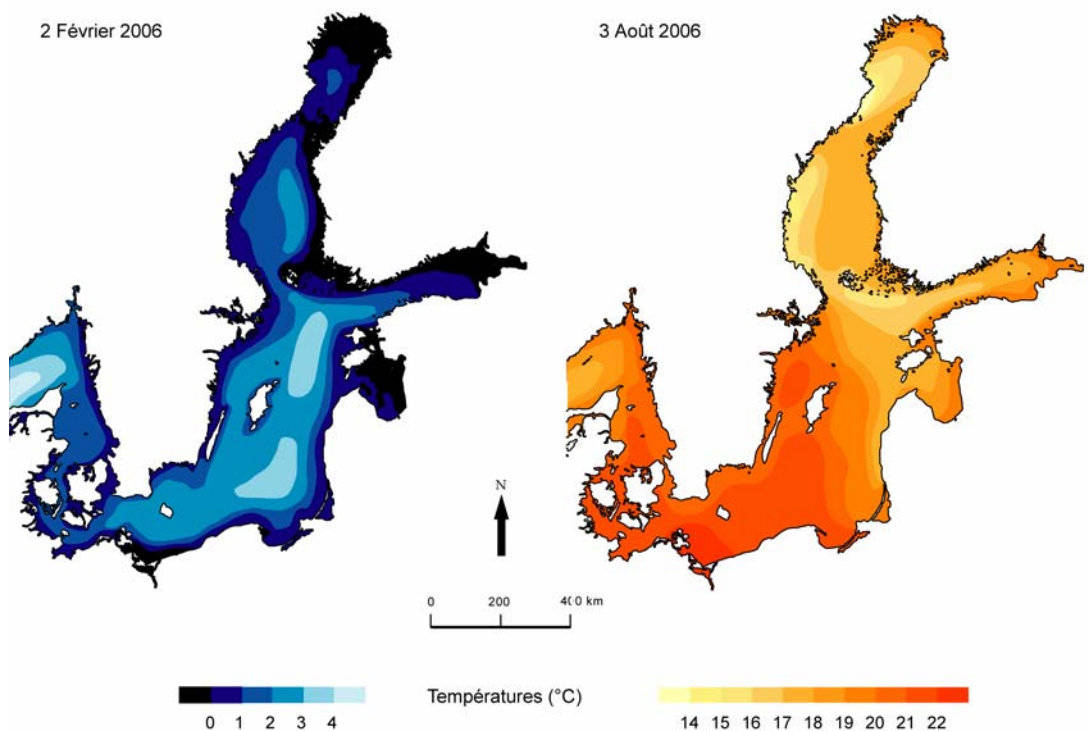
enneigé l'hiver avec des pluies estivales abondantes l'été pour le premier et un été chaud et ensoleillé pour le second. Enfin, la partie orientale du Golfe de Botnie ainsi que les régions continentales offrent un climat continental à hiver froid et sec et à été pluvieux. Sur les côtes, l'été survient relativement tard du fait de la durée de la glaciellisation de la mer.



Carte 11 – Les régions climatiques de la Mer Baltique selon I. Roussel
 Map 11 – Climatic regions of the Baltic Sea according to I. Roussel

2.4 – LES INCIDENCES SUR LE REGIME THERMIQUE DE LA MER BALTIQUE

La distribution thermique des eaux de la Mer Baltique est variable dans l'espace puisqu'elle dépend non seulement des températures de l'air et donc des radiations solaires, mais également de l'arrivée d'eau océanique plus chaude venue de la Mer du Nord par les détroits danois. L'eau de surface de la Baie de Botnie est alors plus froide que l'eau de surface de la Baltique Propre. Le régime thermique de la Baltique est aussi influencé par les saisons et donc plus généralement par le climat. La carte 12 présente deux situations de température des eaux de surface de la Mer Baltique aux 2 février et 3 août 2006. Le maximum thermique est atteint fin juillet pour les eaux de surface (Mälkki et Tamsalu, 1985, 51) voire fin août pour les eaux de pleine mer et plus profondes (Guilcher, 1958, 133 ; Mälkki et Tamsalu, 1985, 51). L'été, l'eau de surface des côtes sud de la Baltique a une température souvent supérieure à celle des côtes de Mer du Nord et de la Manche.



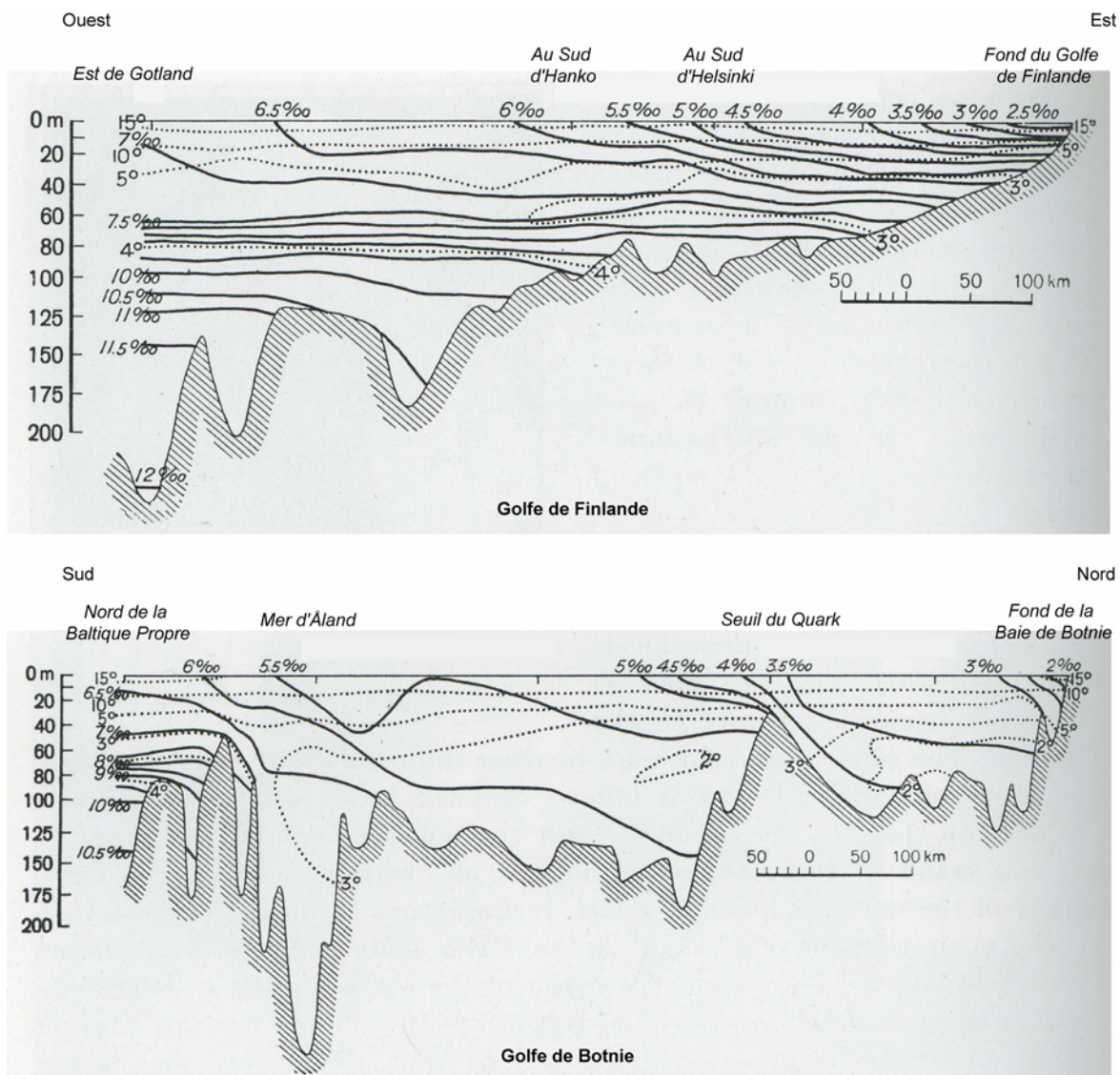
Réalisé par Élise Lépy
à partir des cartes du Swedish Meteorological and Hydrological Institute

Cartes 12 – Températures des eaux de surface de la Mer Baltique pendant l'hiver et l'été 2006
Map 12 – Surface water temperatures of the Baltic Sea in winter and summer 2006

La variabilité spatio-temporelle de la température des eaux de surface s'explique par la forte stratification verticale des différentes couches d'eau qui subissent de nombreuses inversions thermiques au cours d'une année. En effet, l'échauffement estival

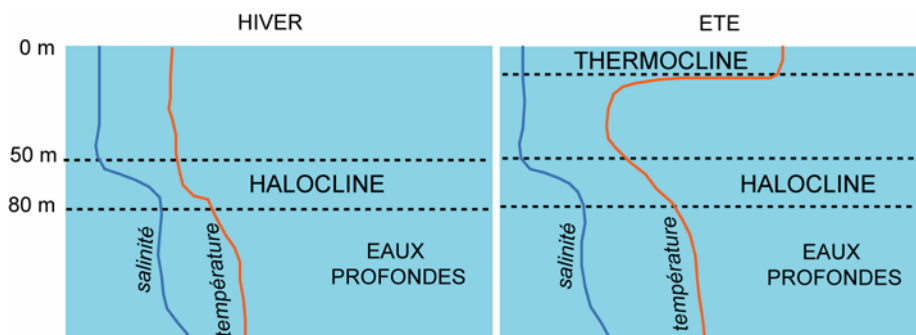
augmente les différences de température entre les eaux de surface et les eaux de fond. Il est alors possible de distinguer quatre couches d'eau (Guilcher, 1958, 133 ; Kullenberg, 1981, 141 ; Mälkki et Tamsalu, 1985, 51) qui dépendent également du taux de salinité (les couches d'eau les plus profondes sont plus salées que les eaux de surface, figures 6 et 7). La couche supérieure, chaude (15-18°C) et peu salée, s'étend de la surface jusqu'à la thermocline saisonnière (0-20 mètres). Très logiquement la température de l'eau diminue avec la profondeur et la deuxième couche, froide (2-3°C), est relativement homogène délimitée en profondeur par la partie supérieure de l'halocline (50-60 mètres). Au niveau de l'halocline où s'observe une augmentation brutale du taux de salinité, la température de l'eau devient plus élevée. Sous cette couche, là où la profondeur est importante, la couche de fond est légèrement plus chaude que la précédente et le taux de salinité y reste fort. À l'automne, l'eau de surface descend en profondeur, alourdie par le refroidissement, la thermocline disparaît et il se produit une homogénéisation des 40 mètres supérieurs. En hiver, la surface continue de se refroidir jusqu'à atteindre son point de congélation : -0,2°C en Baie de Botnie et -0,45°C en Baltique Propre où le taux de salinité est plus élevé (FIMR). L'eau de surface n'est alors plus assez dense pour descendre vers le fond, il s'opère alors une inversion thermique : l'eau de la couche homogène des 80 mètres supérieurs dans le Golfe de Botnie et 50-70 mètres supérieurs dans la Baltique Propre, est alors plus froide que les eaux profondes. À l'arrivée du printemps l'eau de surface se réchauffe et une nouvelle inversion thermique se produit avec l'apparition de la thermocline. La distribution verticale des températures de l'eau de mer permet ainsi de mieux comprendre l'englacement de la Baltique et ses contrastes régionaux.

Comme on l'a évoqué précédemment, le régime thermique de la Mer Baltique influe donc sur les conditions climatiques régionales. La glaciellisation partielle de la mer modifie les caractères climatiques de certaines stations littorales dans le sens d'une plus grande « continentalité » (Roussel, 1989, 567). L'inertie thermique de la mer prolonge alors les caractéristiques thermiques de l'hiver jusqu'au début de l'été. Les saisons intermédiaires, printemps et automne, sont ainsi raccourcies et ne sont que la prolongation des saisons hivernales et estivales. Toutefois, l'englacement partiel ne fait pas disparaître les contrastes entre mer et continent (Planchon, 1997, 89) : les eaux libres de glace permettent aux perturbations atlantiques de se réactiver et de déverser des précipitations sur les espaces continentaux voisins.



D'après Jurva, 1952b, modifié

Figure 6 - Salinité des eaux marines des Golfs de Finlande et de Botnie
Figure 6 - Marine waters salinity in the gulfs of Finland and Bothnia



Source : Backer, FMI

Figure 7 - Variation de la salinité et de la température
Figure 7 - Salinity and temperature variations

2.5 - L'ORIGINALITE DE L'ESPACE MARIN DE LA BALTIQUE

Désormais il convient de définir les limites géographiques de notre espace d'étude : le littoral et la mer côtière. Ces deux notions ont été maintes fois définies par diverses disciplines. Mais la glaciellisation des eaux de la Baltique et leur continentalisation ne facilitent pas leur description.

2.5.1 - La continentalisation de l'espace marin

Sur une photographie aérienne, il est parfois difficile de distinguer la mer gelée d'un secteur littoral, plan et enneigé. En effet, la ligne de rivage définie comme ligne de contact entre l'hydrosphère, la lithosphère et l'atmosphère, peut « *être perturbée par la présence de la cryosphère où les glaces de terre et de mer peuvent localement masquer la frontière littorale* » (Verger, 1993, 2). La disparition visuelle du trait de côte est le témoin d'une transformation paysagère et saisonnière du littoral, qui est à l'origine de l'émergence d'un nouvel espace marin appréhendé et perçu différemment par les populations riveraines. La mer côtière considérée comme territoire et recouverte d'une banquise côtière d'épaisseur variable - de quelques centimètres dans le fond du Golfe de Riga à plus d'un mètre dans le Nord de la Baie de Botnie - est alors sujette à une réorganisation saisonnière de son espace marin. Le gel des eaux marines de la Baltique provoque une véritable extension du territoire terrestre et par conséquent celle de certaines activités humaines afférentes. Il faut cependant modérer ces propos et les considérer surtout valables pour la Baie de Botnie puisque, pour des raisons naturelles, historiques et culturelles, les populations finlandaises et lettones n'appréhendent pas la banquise côtière de la même manière¹⁰. Pendant les mois les plus froids, la mer côtière et le littoral de la Baie de Botnie font donc face à la continentalisation de leur espace marin.

2.5.2 - Définitions de l'espace marin étudié : le littoral et la mer côtière

Dans le cadre de cette recherche, l'étude se porte plus précisément sur la mer côtière et les littoraux des Golfes de Botnie et de Riga.

Le littoral est un espace complexe dont les sens et les limites fluctuent selon les approches disciplinaires. Alors que les juristes proposent une définition précise en terme de délimitation du littoral, les géomorphologues et géographes ne soumettent pas de limites figées puisqu'ils considèrent que le littoral est un espace dynamique et mobile (Guilcher, 1954 ; Goeldner, 1993 ; Verger, 1993 ; Miossec, 1998 ; Paskoff, 1998 ; Meur-Férec, 2006). Le littoral est « *un espace à l'interface terre - mer, soumis à l'influence combinée des*

¹⁰ L'appréhension et la perception de la banquise et des processus cryomarins qui y sont associés sont davantage étudiés dans les chapitres 7 et 9.

dynamiques marines et atmosphériques, et des apports des bassins versants côtiers, qu'ils soient d'origine naturelle ou anthropique. La variabilité naturelle de la zone littorale et côtière et son large spectre d'utilisation se distingue de la relative homogénéité de l'océan ouvert » (Programme Liteau).

La mer côtière, quant à elle, est un espace difficile à appréhender qui prête souvent à confusion tant les termes liés au côtier sont nombreux et indifféremment utilisés. On parle ainsi de zone côtière, bande côtière ou encore mer côtière, termes qui ne recouvrent pas forcément les mêmes espaces géographiques (Le Tixerant et *al.*, 2005).

Subissant de fortes pressions anthropiques dues à l'exploitation des ressources marines, la mer côtière est un espace soumis graduellement à des processus de territorialisation. Brice Trouillet (2004) la considère ainsi comme un territoire en cours de construction et la perçoit comme un laboratoire qui permet d'évaluer les rapports entre nature et société à travers le processus de territorialisation. Il précise que la mer côtière est un « *territoire discontinu, composite, protéiforme* » et qu'elle suppose un emboîtement de discontinuités (Trouillet, 2004, 46). L'interface terre / mer constitue une première discontinuité qui est mobile dans l'espace en fonction des marées. La deuxième correspondrait à une limite occupée par les activités maritimes, une « *discontinuité sociétale et mobile* » (*op. cit.*). Bien que la mer côtière ne soit pas une notion juridique (Le Tixerant et *al.*, 2005), cette discontinuité serait définie par la réglementation maritime régissant les activités de pêche et autres.

Or il est difficile de déterminer un espace fixe à notre étude tant le littoral et la mer côtière sont des espaces dynamiques. Le trait de côte y est en perpétuel mouvement et évolution. Il subit les effets de l'érosion marine relativement importante dans le Golfe de Riga puisque le recul du trait de côte s'évaluait dans les années 1990 à 1 - 2 mètres par an au Cap Kaugurs et à 1 - 1,5 mètres à l'embouchure de la Daugava (EuroSION, 2002, 9). Le trait de côte est également changeant à plus long terme de par les mouvements isostasiques ressentis principalement dans la Baie de Botnie. Ces deux espaces côtiers sont non seulement dynamiques du fait des processus naturels modifiant leur environnement mais aussi à cause de l'influence du milieu maritime qu'ils subissent. Ils évoluent en fonction des ressources exploitables et exploitées, des besoins et de l'économie, et des aménagements.

L'espace maritime est cependant réglementé et sous l'emprise d'une certaine juridiction. La Convention des Nations Unies sur le droit de la mer du 10 décembre 1982 reconnaît différentes zones maritimes telles que les eaux intérieures, la mer territoriale, la zone économique exclusive et la haute mer. Elle s'applique aux États signataires à une échelle mondiale. En collaboration avec les Nations Unies, l'Union Européenne apporte des précisions juridiques concernant principalement la conservation et l'exploitation des

ressources marines de ses espaces. Cependant certains espaces maritimes présentent des spécificités et sont considérés comme des cas régionaux. Mer semi-fermée et superficiellement restreinte, la Mer Baltique forme ainsi une entité régionale pour lesquelles certaines lois ne sont pas applicables d'où la mise en place de la Convention d'Helsinki (*HelCom*). Après l'entrée de la Finlande dans l'Union Européenne, celle-ci a dû modifier certaines lois dont celle concernant la mer territoriale (Loi du 31.7.1995/993) qui auparavant s'étendait à 6 milles marins¹¹ et qui, depuis 1995, s'étend à 12 milles marins¹².

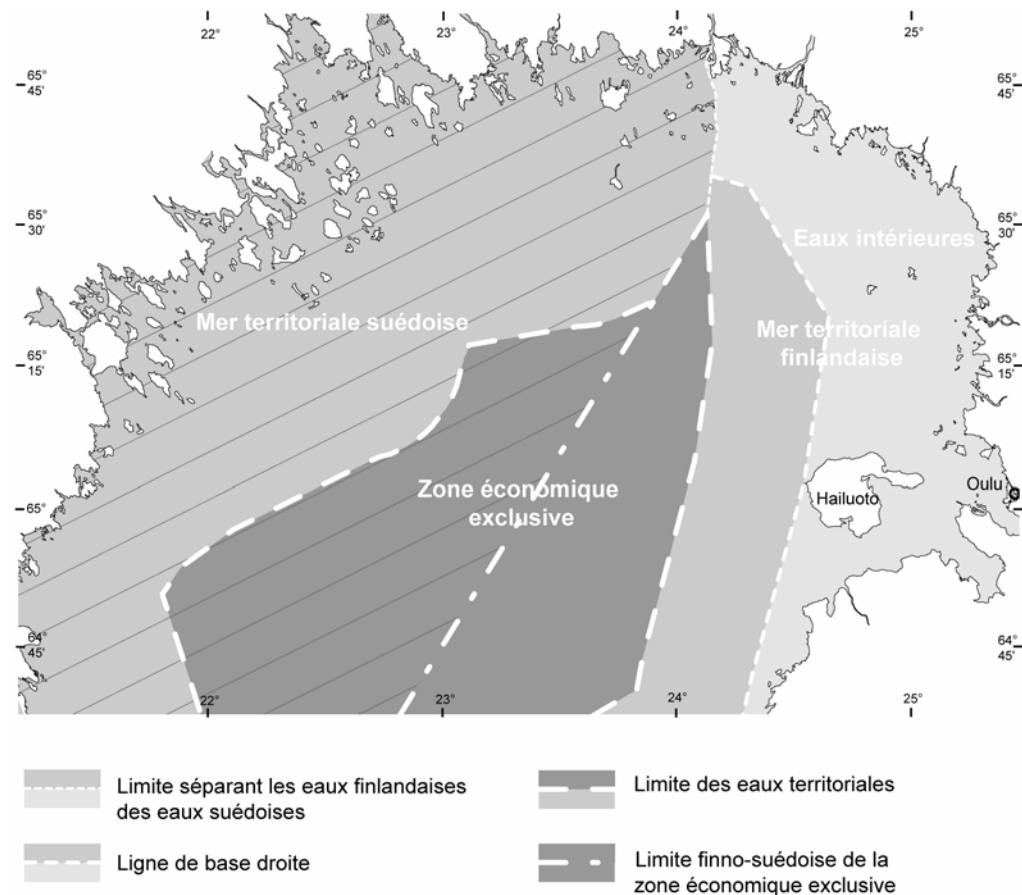
Il semble nécessaire de préciser de façon juridique les diverses zones maritimes qui régissent les activités d'exploitation en Baie de Botnie (carte 13) et dans le Golfe de Riga (carte 14). La mer côtière fait inévitablement référence aux eaux côtières qui sont spécifiées par le Parlement Européen « *telles que des eaux de surface situées en deçà d'une ligne dont tout point est situé à une distance d'un mille marin au-delà du point le plus proche de la ligne de base* » (Directive 2000/60/CE). Les lignes de base sont des lignes de référence correspondant normalement à la laisse de basse mer le long de la côte (art.5-section 2-partie II de la Convention des Nations Unies). Toutefois, la Baie de Botnie est occupée par de nombreuses îles et îlots à proximité immédiate de la côte, la méthode des lignes de base droites a été employée pour définir la ligne de référence à partir de laquelle est mesurée la largeur de la mer territoriale (art.7-section 2-partie II et Loi du 31.7.1995/993). Les eaux situées en deçà de cette ligne de référence font partie des eaux intérieures de l'État. Selon la Convention des Nations Unies « *tout État a le droit de fixer la largeur de sa mer territoriale, cette largeur ne dépasse pas 12 milles marins mesurés à partir de lignes de base établies conformément à la Convention* » (art.3-section 2-partie II). La mer territoriale et les eaux intérieures constituent des zones sous souveraineté (Le Tixerant et *al.*, 2005). À des fins d'exploration, d'exploitation, de conservation et de gestion des ressources naturelles, la zone économique exclusive de la Finlande (Laki Suomen talousvyöhykkeestä 26.11.2004, 2 §)¹³ se délimite de celle de la Suède par une ligne de points partageant la Baie de Botnie en deux (décret du gouvernement finlandais du 2.12.2004/1073, 1 §)¹⁴. Autant dire que la Baie de Botnie est exploitable dans son intégralité. On tend ainsi à considérer la Baie de Botnie dans son ensemble comme mer côtière.

¹¹ 1 mille marin équivaut à 1852 mètres

¹² Application de la loi au 31.7.1995/993 qui précise les coordonnées des points constituant les lignes de base droites (paragraphe 1) et la limite extérieure des eaux territoriales finlandaises (paragraphe 2) (Asetus Suomen aluevesien rajoista annetun lain soveltamisesta 31.7.1995/993)

¹³ Suomen valtion oikeudet ja lainkäyttövalta talousvyöhykkeellä : Suomen valtiolle kuuluu talousvyöhykkeellä oikeus elollisten ja elottomien luonnonvarojen tutkimiseen, hyödyntämiseen, säilyttämiseen ja hoitamiseen sekä muuhun toimintaan, jonka tarkoituksena on vyöhykkeen taloudellinen hyödyntäminen ja tutkiminen. *Droit et juridiction de l'État finlandais sur la zone économique exclusive: la Finlande a le droit de zone économique exclusive des vivants et non vivants ressources naturelles, l'exploration, l'exploitation, de conservation et de gestion, ainsi que d'autres activités visant à la zone d'exploitation économique et de l'examen.*

¹⁴ Valtioneuvoston asetus Suomen talousvyöhykkeestä 2.12.2004/1073 Décret du gouvernement sur la zone économique finlandaise 2.12.2004/1073

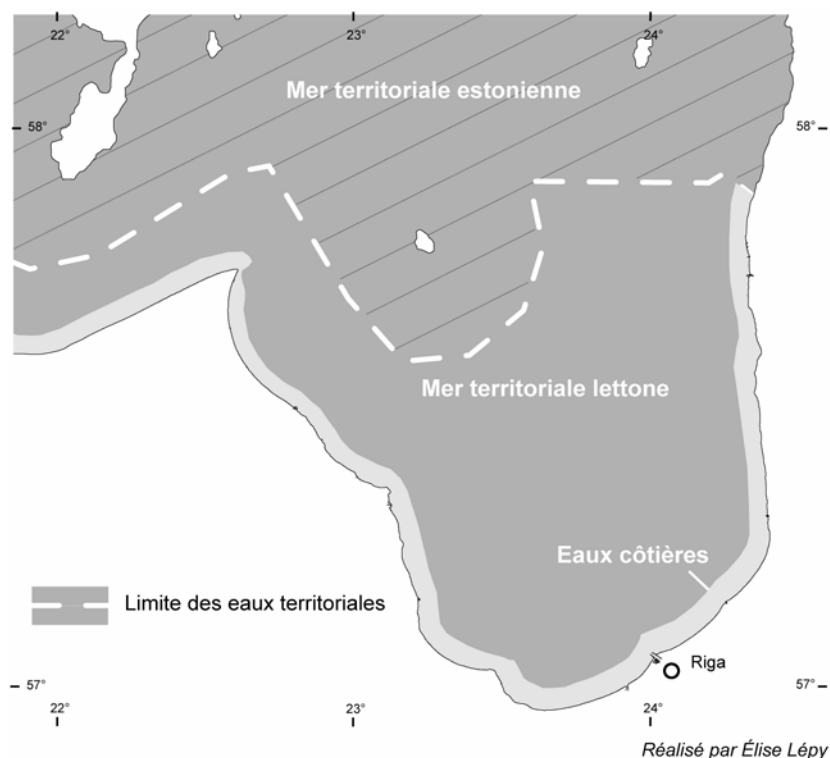


Réalisé par Élise Lépy

Carte 13 – Division juridique des eaux de la Baie de Botnie
 Map 13 – Legal divisions of Bothnian Bay waters

Le Golfe de Riga est quant à lui un cas particulier de la Mer Baltique du fait de sa petite superficie. Le Conseil des Ministres de Lettonie (prot. Nr.37 22.§)¹⁵ déclare que les eaux côtières qui bordent le pays se situent à une distance de deux milles marins de la côte atteignant une profondeur maximale de 20 mètres. Ces eaux côtières sont partie intégrante des eaux territoriales. Le Golfe de Riga étant un cas particulier du point de vue juridique, les eaux territoriales de la Lettonie ne peuvent pas être délimitées par la Convention des Nations Unies. Elles comprennent alors les eaux intérieures, les eaux côtières et la zone économique du pays en Mer Baltique (Maritime Administration of Latvia, 2002, 14).

¹⁵ prot. Nr.37 22.§ : piekrastes ūdeņi — Latvijas Republikas teritoriālo ūdeņu daļa, kas atrodas ne tālāk par divām jūras jūdzēm no krasta un kur dziļums nepārsniedz 20 m), kā arī tajos publiskajos ūdeņos (tai skaitā jūras piekrastes ūdeņos *Eaux côtières – Les eaux territoriales côtières de la République de Lettonie se situent à moins de 2 milles marins de la côte et où la profondeur n'excèdent pas 20 mètres*



Carte 14 – Division juridique des eaux du Golfe de Riga
 Map 14 – Legal divisions of Riga Gulf waters

En raison des définitions géographiques et juridiques s'associant à la notion de mer côtière et aux différentes zones maritimes, on tend désormais à considérer comme mer côtière l'ensemble de la Baie de Botnie et du Golfe de Riga. Cependant notre étude se limite majoritairement aux eaux finlandaises pour la Baie de Botnie et au fond du Golfe de Riga.

2.6 – CONCLUSION

À travers ce chapitre, nous avons vu les particularités physiques qui contribuent à l'englacement saisonnier d'une partie des eaux de la Mer Baltique : des conditions climatiques favorables, la faible profondeur des fonds marins, les eaux adoucies par la quasi - « fermeture » du bassin et par l'apport d'eau continentale ... Tous ces éléments participent à la prise en glace des eaux des littoraux et de la mer côtière des golfes de la Baltique, espaces que nous avons précédemment définis en terme géographique et juridique pour la Baie de Botnie et le Golfe de Riga.

Chapitre 3

Approche méthodologique

La recherche scientifique en géographie repose le plus souvent sur une approche qui lui est classique : la démarche inductive même si le rôle de l'hypothèse est souvent essentiel dans les questionnements initiaux. L'observation et la description des faits précèdent le plus souvent la construction de théories, faisant ainsi appel à un travail de terrain considérable. Qui serait géographe sans aller observer d'abord les phénomènes étudiés ! D'autre part, comme on a pu déjà l'évoquer, ce travail prend en considération tous les éléments du milieu faisant appel à la fois aux composantes physiques et humaines de la géographie. Cette approche systémique a amené à l'utilisation de deux méthodes bien connues, essentielles aux géographes : les approches qualitative et quantitative. Par ailleurs, les phénomènes observés se doivent d'être illustrés et surtout spatialisés sous forme cartographique. Enfin, il est important de souligner ici les difficultés rencontrées au cours de la collecte de données, étape qui a souvent demandé insistance et persévérance et parfois conduit à l'insatisfaction.

Enfin il faut rappeler que notre démarche de recherche a pour particularité de vouloir comparer deux espaces d'étude à l'étranger, ce qui pose la question parfois délicate de l'équilibre inégal et de la complémentarité relative de leurs informations.

3.1 – LE CONTEXTE GEOGRAPHIQUE DE LA RECHERCHE

Une des étapes majeures à l'élaboration de cette thèse fut le travail de terrain indispensable à tout travail géographique. L'espace d'étude étant à l'étranger, il a fallu organiser les différentes missions de terrain en fonction des saisons selon les périodes d'embâcle et de débâcle. C'est au cours de six missions de terrain, de durée très variable (de deux semaines à dix mois), qu'ont pu être observés les phénomènes d'embâcle et de débâcle ainsi que leurs impacts et interactions avec les milieux physiques et humains entre 2004 et 2008. Ces missions se sont déroulées sur des espaces littoraux et de mer côtière représentatifs des fonds des golfes de Botnie et de Riga à savoir sur la côte finlandaise de la région d'Oulu et sur le littoral de la capitale lettone.

Ainsi, le choix de la région littorale de la municipalité d'Oulu (65° 01' Nord ; 25° 28' Est) s'est fait pour deux raisons essentielles : tout d'abord elle offre des conditions

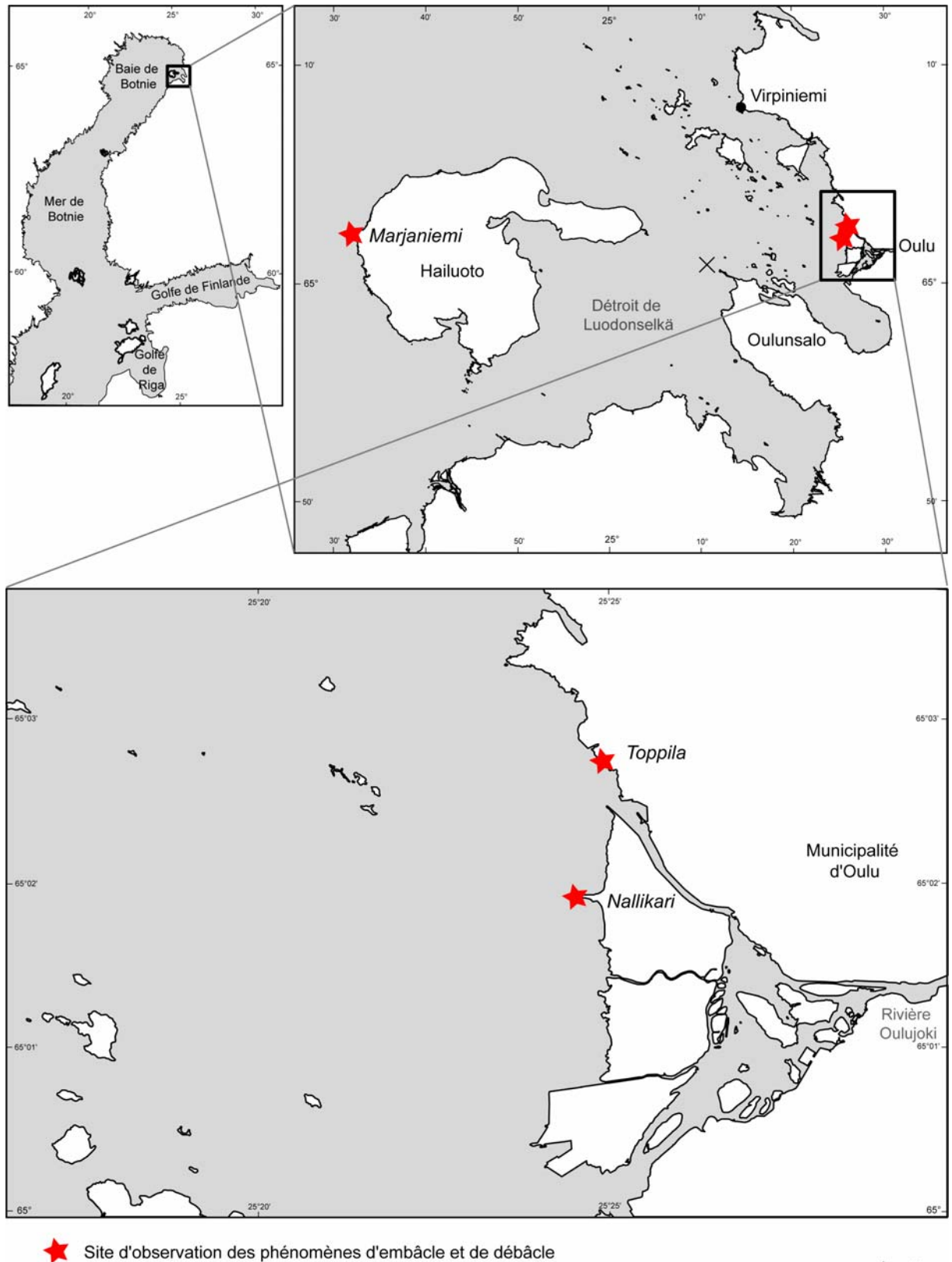
glacielles qui sont communes à d'autres sites côtiers de la Baie de Botnie ; ensuite, vu son importance économique et sociale, il s'agit de la sixième ville de Finlande et sa région offre un espace littoral et marin très exploité par sa population côtière. Anciennement importante exportatrice de fourrure, saumon puis goudron, Oulu s'est orientée vers la haute technologie devenant en ce domaine le centre de compétence le plus septentrional d'Europe. Le contexte géographique favorable d'Oulu a ainsi permis de disposer de trois sites « permanents » d'observation des phénomènes d'embâcle et de débâcle, localisés sur la carte 15 :

- Toppila (photographie 5a), situé aux 65° 02' Nord et aux 25° 24' Est, est l'une des plus anciennes parties du Port d'Oulu. Elle est bordée à la fois par les eaux marines du golfe et par les eaux fluviales et douces de la rivière Oulujoki ;
- Nallikari (photographie 5b), localisé aux 65° 01' Nord et aux 25° 24' Est, est la plage aménagée de la ville située sur l'île de Toppilansaari ;
- Marjaniemi (photographie 5c), aux 65° 02' Nord et aux 24° 33' Est, est situé à l'extrémité Ouest de l'île d'Hailuoto et est donc plus exposée aux influences maritimes.

Ces trois sites d'observation présentent, du fait de leur situation géographique, des conditions de formation et de fonte de la glace variées. Même si la fréquentation de ces sites a été quelque peu inégale pour des raisons d'ordre technique (distance, transport, conditions météorologiques défavorables), elle est restée toutefois régulière. À côté de ces observations faites régulièrement, certaines se sont déroulées de façon plus ponctuelle lors de diverses excursions le long du littoral du Golfe de Botnie.

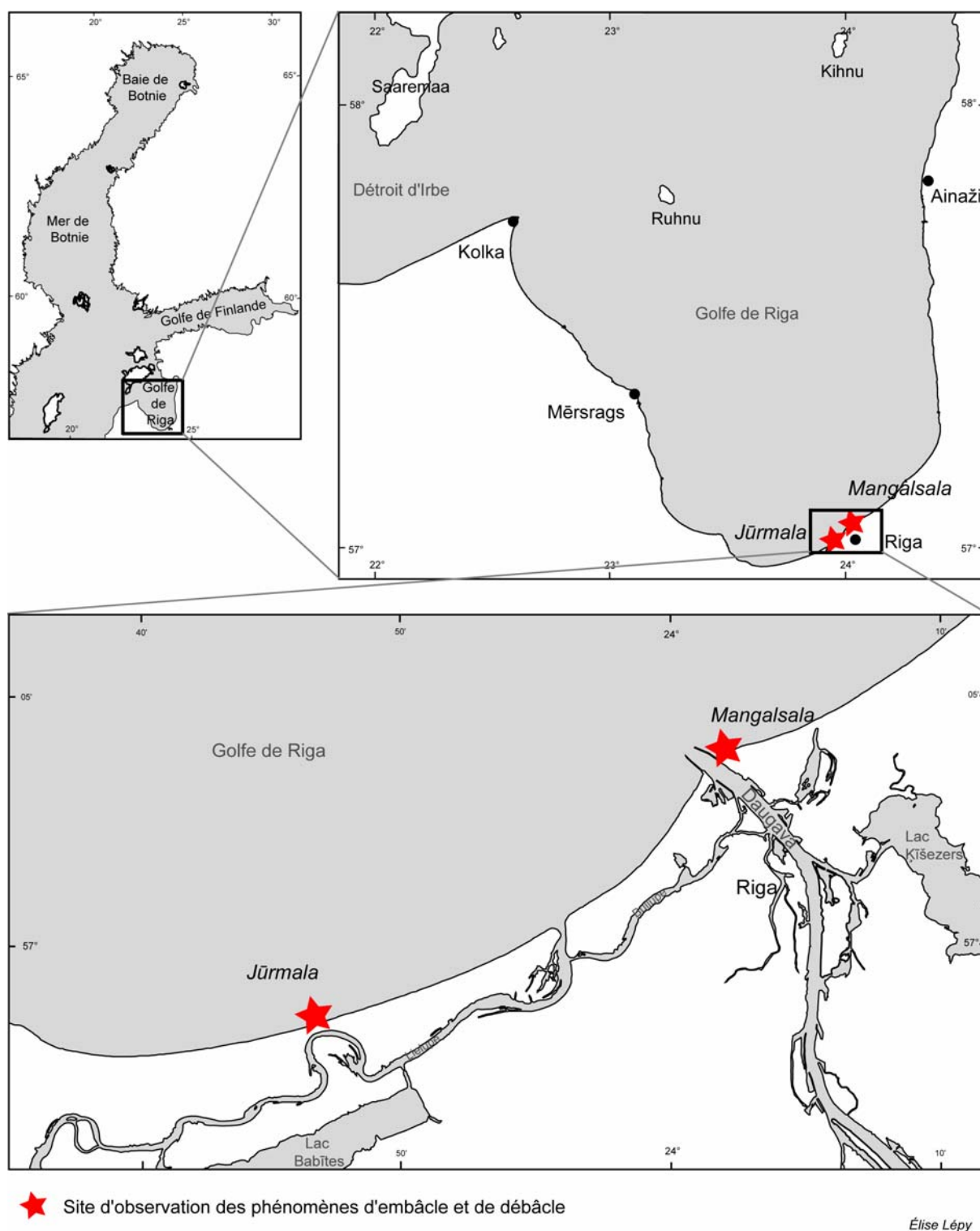
Dans le but de compléter et spécifier certains éléments de cette étude et de bénéficier d'une comparaison, notre choix s'est aussi porté sur le fond du Golfe de Riga. La principale mission de terrain a eu lieu dans la région littorale de la ville de Riga, capitale de la Lettonie. Forte de ses 725 000 habitants (2006), Riga est la plus grande ville des États baltes. Ville portuaire, ses liens commerciaux se développent davantage avec l'Ouest depuis l'adhésion de la Lettonie à l'Union Européenne en 2004. Ville côtière, Riga dispose avec sa région de nombreux sites littoraux où l'observation de la banquise côtière a été rendue possible. Nous nous sommes ainsi déplacée sur deux sites au contexte géographique quelque peu différent (carte 16) :

- la plage de Jurmala (photographie 5d), située aux 56° 58' Nord et aux 23° 46 Est, est la plus grande station balnéaire et thermale des pays baltes (Ville de Jurmala). Sa localisation géographique permet d'apprécier aisément les glaces de mer lors d'hivers assez froids ;
- alors que Mangalsala (photographie 5e), aux 57° 03' Nord et aux 24° 01 Est, est un quartier côtier de Riga situé à l'embouchure de la Daugava. La rencontre des eaux fluviales et marines y est alors intéressante.



Élise Lépy

Carte 15 – Localisation des sites d'observation dans la région d'Oulu
 Map 15 – Observation sites in Oulu region



Carte 16 – Localisation des sites d'observation dans la région de Riga
 Map 16 – Observation sites in Riga region



Photographies 5 – Les sites d’observation finlandais et lettons

En Baie de Botnie, a : Toppila – 13 mars 2005 ; b : Nallikari – 15 avril 2005 ; c : Marjaniemi – 22 mars 2008

Dans le Golfe de Riga, d : Jurmala – 26 février 2006 ; e : Mangalsala – 18 mars 2006

Pictures 5 – Finnish and latvian observation sites

In the Bay of Bothnia, a : Toppila – March 13th 2005 ; b : Nallikari – April 15th 2005 ; c : Marjaniemi – March 22nd 2008

In the Gulf of Riga, d : Jurmala – February 26th 2006 ; e : Mangalsala – March 18th 2006

3.2 – L'APPROCHE QUALITATIVE

L'approche descriptive et qualitative est indispensable à toute recherche géographique puisqu'elle est à l'origine de la collecte des données. Effectivement, ses méthodes d'acquisition relèvent, ici, de mesures empiriques variées telles l'observation, les entretiens suivis d'une phase de transcription et l'analyse de sources bibliographiques.

D'autre part, il semble opportun de préciser que la méthodologie de recherche n'a pas été linéaire car lorsque la recherche progressait, de nouveaux phénomènes apparaissaient nécessitant d'autres observations.

3.2.1 – L'observation

L'étape essentielle à toute démarche géographique est, bien entendu, celle de l'observation. Dans le cadre de ce travail de recherche, elle a pour objectif la description des phénomènes naturels de prise en glace et de fonte des eaux marines d'une part, et celle des phénomènes sociétaux d'autre part. Mais bien au-delà de l'étude des réactions des populations face à la présence hivernale des glaces de mer, elle a permis de comprendre le fonctionnement administratif et institutionnel des sociétés finlandaise et lettone.

3.2.1.1 – *L'observation des glaces de mer*

Même si leur variabilité temporelle demeure importante, les processus glaciels majeurs ont lieu à l'automne (embâcle) puis au printemps (débâcle). Les diverses missions de terrain menées majoritairement à Oulu ont permis d'observer la prise en glace et la débâcle des glaces marines pendant plusieurs hivers au degré de sévérité variable. En revanche, l'unique excursion à Riga n'a permis de se rendre compte que de la débâcle des eaux marines du fond du golfe.

La banquise, de sa formation à sa disparition, est théoriquement observable de différents points de vue : la vision au « sol », c'est-à-dire de la côte et sur la banquise elle-même, en est la forme la plus commune ; et en altitude si l'opportunité est offerte d'un survol aérien.

Autant dire que pour des raisons d'opportunité, l'observation dite « au sol » a été ici privilégiée. D'un point de vue pratique, elle offre un accès peu contraignant et régulier à l'espace d'étude. Elle permet alors de se familiariser et de s'adapter à ce nouvel espace hivernal qu'est la banquise. En tant que chercheur, on se trouve alors à la fois

observateur (de la banquise et de son environnement) et acteur (impliqué dans l'exploitation de l'espace marin gelé). La plupart des observations menées se sont donc déroulées du rivage (plage...) à quelques centaines de mètres de la côte sur la banquise côtière.

Toutefois, on pourrait penser que les déplacements sur la banquise se sont déroulés seulement à pied comme souvent il a été le cas. Mais la routine de cette approche de terrain a été interrompue à plusieurs reprises puisque nous avons eu l'opportunité de nous déplacer sur la banquise avec d'autres moyens telles l'automobile ou encore la motoneige. Ces autres moyens d'approcher le terrain ont permis d'avoir une perception autre de cet espace.

Aussi particulière mais plus difficile à concrétiser, a été la navigation dans les glaces de mer à bord d'un brise-glace. Cette expérience unique pour nous et très enrichissante a permis d'acquérir un nouveau point de vue sur les mouvements de la banquise côtière et sur le déroulement de la navigation maritime hivernale.

Une autre possibilité de l'approche de terrain s'est déroulée en altitude dans le Golfe de Riga. Cette autre opportunité, encore une fois unique pour nous, qu'a été le survol en hélicoptère des glaces marines du golfe a permis d'apprécier, vue du ciel, l'état de la banquise au commencement de la fonte printanière.

Toutes ces expériences nouvelles et souvent surprenantes ont permis d'avoir des conditions d'observation exceptionnelles et surtout diverses de l'état de la banquise et des activités maritimes hivernales.

3.2.1.2 – L'observation des sociétés finlandaise et lettone

Les comportements sociétaux face à la prise en glace saisonnière des eaux marines sont très intéressants à observer de part et d'autre de la Baltique. Leur simple observation sur les sites littoraux donne un premier niveau d'informations sur la culture et les us et coutumes des sociétés. Il a été ainsi possible d'observer les réactions anthropiques face à la banquise.

Par ailleurs, à une autre dimension de l'approche sociétale et culturelle, il a fallu faire preuve d'un esprit ouvert et compréhensif, de patience et d'observation pour comprendre le fonctionnement des institutions, des administrations et diverses autres structures pour mener à bien la collecte des données dans deux pays qui nous étaient bien entendu, totalement étrangers. Mais toutes ces démarches avaient également pour finalité de s'intégrer aux populations en tant que chercheur.

3.2.2 – Les entretiens

Les entretiens constituent une méthode d'acquisition indispensable à la collecte de données qualitatives. En effet, la rencontre de personnalités du monde scientifique telles que des professeurs d'université ou encore des spécialistes d'instituts de recherche tels l'Institut finlandais de recherche marine ou encore l'Institut météorologique de Finlande, a été une étape importante et nécessaire à la quête d'information et de données. Cependant, les données écrites ne suffisent pas à rendre compte de la réalité de terrain. Ainsi, il a été indispensable de rencontrer les « acteurs » locaux, à savoir les employés d'administrations maritimes, des ports, des garde-côtières... ainsi que les usagers de la mer tels les pêcheurs, les chasseurs de phoques, les kytesurfers, et plus généralement les populations locales. Ces rencontres (répertoriées en annexe 4) ont été essentielles dans l'apport de connaissances et de documentations variées.

Ces rencontres ont toutes reposé sur des entretiens semi-directifs réalisés de façon individuelle auprès des personnels d'administrations et de diverses institutions, et des « acteurs » de la banquise (pêcheurs, chasseurs, sportifs...). L'usage du dictaphone s'est avéré alors indispensable à la collecte d'information orale.

Cependant, il convient de préciser qu'un premier choix avait porté sur le questionnaire et non l'entretien pour les « acteurs » de la banquise. Mais la réalité de terrain s'est vite avérée inattendue. Face à des problèmes techniques et parfois linguistiques qui n'ont pas favorisé le bon déroulement de ces enquêtes sur le terrain, ces dernières se sont souvent vues modifier en entretiens semi-directifs.

Puis, le traitement des données recueillies lors de ces entretiens a résulté d'un travail très long et fastidieux de transcription de dialogues d'enregistrements audios effectués avec le dictaphone. Il a été important d'établir cette tâche peu de temps après chaque entretien afin de transcrire le plus fidèlement possible les dires des personnes interrogées. Très souvent l'analyse informative a été privilégiée aux dépens de l'analyse statistique.

3.2.3 – L'analyse des sources bibliographiques

L'une des étapes primordiales à toute recherche est la quête de documents bibliographiques et l'analyse de leurs textes. Elles permettent de faire la synthèse des travaux réalisés sur la thématique et le terrain d'étude et ainsi de définir au mieux la problématique et ses questionnements. L'apport de connaissance au travers la lecture est essentiel afin d'enrichir les acquis et connaissances préalables sur le milieu étudié.

Or la bibliothèque de l'Université d'Oulu dispose d'un fond documentaire très riche en revues scientifiques internationales. L'accès à certains articles et travaux en a

donc été rendu plus aisé. Nous avons également eu accès aux archives de la LEGMA, à Riga, qui emmagasine tous les travaux effectués par l'agence et d'autres documents récupérés après la Seconde Guerre Mondiale. Les documents cartographiques ont souvent fait cas de sources historiques, les plus anciens datant de l'après-guerre. Ainsi, des atlas russes relatant les conditions climatiques et glacielles de la Baltique ont été publiés après la Seconde Guerre Mondiale.

La dimension historique est à prendre en considération dans l'étude de ces régions au passé historique souvent lourd. Cette approche autorise une réflexion intéressante sur la critique des sources. D'autre part, on notera que la majorité des sources bibliographiques sont en langue anglaise et que de nombreuses archives sont publiées en letton, russe et allemand nécessitant l'aide d'une personne pour leur traduction.

3.3 – L'APPROCHE QUANTITATIVE

L'utilisation combinée des méthodes qualitatives et quantitatives est indispensable dans le cadre d'une recherche en géographie. L'approche qualitative non seulement informe mais peut également confirmer les interprétations fournies par les méthodes quantitatives. L'approche quantitative repose principalement, dans cette étude, sur le traitement statistique de séries de données climatiques et météorologiques, de données relatives aux conditions de glace, et de données qualitatives.

3.3.1 – Les traitements statistiques de données quantitatives

3.3.1.1 – Les données climatiques

Les séries de données climatiques recueillies pour cette étude concernent les stations météorologiques d'Oulu et de Riga. Dans les deux cas, les valeurs moyennes mensuelles et absolues ont été retenues. Ces données ont été recueillies après homogénéisation par les instituts météorologiques finlandais et lettons. Les traitements statistiques effectués sur ces données mettent en évidence l'évolution climatique des deux régions d'étude.

3.3.1.1.1 – La station météorologique d'Oulu

Les données climatiques recueillies à la station d'Oulu couvrent une période de 134 ans, de 1873 à 2007. Certains éléments sont à prendre en considération dans le traitement de ces données : la localisation de la station météorologique et les instruments de mesure, les paramètres mesurés, et l'origine de ces données.

La station météorologique d'Oulu a longtemps été située au cœur de la ville (65°01' Nord ; 25°27' Est) avant d'avoir été relocalisée au début des années 1950 à l'aéroport d'Oulunsalo qui se situe plus au Sud. Dans les années 1990, certains instruments de mesure ont été relocalisés comme l'anémomètre situé à 16 mètres de hauteur et qui est à 10 mètres de nos jours. Les instruments de mesure sont changés au maximum tous les 50 ans. Pour ces raisons, l'Institut météorologique finlandais effectue des tests d'homogénéité avant de publier ses données.

Au cours des deux derniers siècles, les paramètres mesurés ont augmenté. La température de l'air en degrés Celsius était le premier et seul paramètre mesuré dans la seconde moitié du XIX^{ème} siècle. Puis la force du vent, le total des précipitations tombées et le taux d'humidité ont fait leur apparition dans les documents imprimés et publiés à partir de la fin du XIX^{ème} siècle.

Enfin, il faut souligner que d'anciennes sources bibliographiques concernant des données climatiques de la station d'Oulu étaient publiées en langue française (*La Société des sciences de Finlande* puis *l'Institut météorologique central de la Société des sciences de Finlande*) à la fin du XIX^{ème} siècle puis en langue allemande (*Meteorologischen Zentralanstalt*¹⁶) au début du XX^{ème} siècle. C'est à la moitié du XX^{ème} siècle que les publications sont apparues en langue finnoise (*Ilmatieteellinen Keskuslaitos*¹⁷).

3.3.1.1.2 – La station météorologique de Riga

Le lourd passé historique des pays baltes s'est fait ressentir lors de la quête de données. La variété des sources indique que de nombreux événements historiques se sont déroulés et imposent diverses questions telles que l'uniformité et l'étalonnage des instruments de mesure. Essentiellement lettones, allemandes et russes, ces multiples sources s'expliquent par la succession de gouvernements et pouvoirs qui ont géré la Lettonie.

Des données climatiques s'étendant sur plus de 200 ans sont inévitablement témoins de nombreux changements politiques et historiques. L'année 1795, correspondant aux données les plus anciennes, fut l'année pendant laquelle la Russie a achevé d'étendre son empire à la Lettonie, extension qu'avait entamé Pierre le Grand en 1721. Pendant plusieurs décennies, les Lettons ont été sous l'influence des Russes et des Allemands. Ces derniers étaient au cœur de la vie politique locale, sociale, de la vie économique et culturelle alors que la bureaucratie russe était en charge des administrations et de la politique (Dreifelds, 1996, 22). Au sortir de la Première Guerre mondiale pendant laquelle ils étaient sous occupation allemande, les Lettons acquièrent l'indépendance de leur pays en créant le 18 Novembre 1918 un état démocratique et indépendant. Ces vingt années

¹⁶ Centre météorologique

¹⁷ Institut Finlandais de météorologie

d'indépendance ont pris fin à la veille de la Seconde Guerre Mondiale qui a vu l'Union des Républiques Socialistes Soviétiques envahir la Lettonie occupée par la suite par l'Allemagne nazie, puis de nouveau occupée par l'URSS qui l'annexe alors et en fait une république socialiste soviétique. Les événements de 1991 ont permis à la Lettonie comme d'autres républiques socialistes soviétiques de retrouver son indépendance.

C'est ainsi qu'une multitude d'organismes se succèdent à la collecte des données météorologiques journalières et à la publication des données : le *Meteorologische Beobachtungen*¹⁸, le Service central soviétique d'hydrométéorologie (Administration de Lettonie¹⁹), la Direction du Service hydrométéorologique du Conseil des ministres de l'URSS (le Service hydrométéorologique de Lettonie²⁰), le Comité d'État de l'URSS de météorologie et de l'environnement (RSS de Lettonie²¹), et la République de Lettonie à partir de 1992.

De même que pour la station météorologique d'Oulu en Finlande, il est aisé de comprendre que pendant plus de deux siècles de mesure de paramètres, les instruments de mesure ont évolué et la station de Riga a été maintes fois relocalisée. En annexe 5, figure un récapitulatif chronologique des différents points de mesure connus, de l'origine des sources bibliographiques et des divers paramètres mesurés. La nature et le vécu des documents archivés ont parfois laissé place à un travail de déchiffrement complexe puisque les données les plus anciennes ont été manuscrites avant d'avoir été dactylographiées à partir de 1971. Il faut effectivement prendre en compte que la relocalisation de la station de mesure a pu, tout dépendamment du contexte géographique et environnemental, jouer un rôle important sur les paramètres mesurés et sur la continuité des séries de données. Ces paramètres ainsi que leurs unités de mesure ont énormément évolué en deux siècles. Seul paramètre mesuré à la fin du XVIII^{ème} siècle, la température s'est vu accompagner par la suite par le taux d'humidité relative et le vent, puis par les précipitations et le gel, chacun des paramètres étant davantage détaillé au fil du temps. Il faut également considérer qu'en fonction des événements historiques, les séries de données peuvent être incomplètes.

3.3.1.2 – Les données statistiques relatives aux conditions de glace

Les plus anciennes séries de données publiées concernant les conditions de glaces marines datent du début du XX^{ème} siècle. Le centre de recherche océanique de Finlande *Merentutkimuslaitoksen Julkaisu* (actuel *Finnish Institute of Marine Research*) met en

¹⁸ Observations météorologiques allemandes

¹⁹ PSRS galvenā hidrometeoroloģiskā dienesta pārvalde pie PSR Savienības TKP, Latvijas HMD Pārvalde

²⁰ Главное управление гидрометеорологической службы при совете министров СССР, Управление гидрометеорологической службы Латвийское

²¹ Государственный комитет СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды УГКС Латвийской ССР

place chaque hiver des campagnes de mesure de l'épaisseur de glace et des dates de première prise en glace et débâcle. C'est dans les années 1970 que la revue scientifique *Finnish Marine Research* publie ces données avant de laisser place à la revue *Meri* dans les années 1990.

Les données relatives aux dates d'embâcle et de débâcle et qui ont été retenues pour notre étude, se concentrent sur quatre phases :

- le début de l'embâcle qui voit apparaître les premières glaces flottantes ;
- la formation du couvert de glace permanent ;
- la disparition de ce couvert de glace qui correspond au commencement de la fonte des glaces ;
- puis la fin de la débâcle qui voit disparaître les toutes dernières glaces flottantes.

Les séries de données retenues concernent certaines stations finlandaises du Golfe de Botnie telles Kemi, Oulu, Raahe, Kokkola et Vaasa.

Les épaisseurs du couvert de glace de la Baie de Botnie sont mesurées aux stations côtières par les agents des instituts de recherche marine ou par les garde-côtes qui retransmettent par la suite les valeurs mesurées. Elles concernent une vingtaine de stations finlandaises et suédoises de la Baie de Botnie qui, toutefois, n'offrent pas des séries complètes de données. L'épaisseur du couvert de glace mesurée prend en compte l'épaisseur de glace proprement dite, puis celle de la neige fondante gelée et enfin celle de la neige recouvrant la couverture glacielle.

Concernant, le Golfe de Riga, les mesures diverses des conditions glacielles sont très irrégulières voire seulement ponctuelles. Les séries de données présentent donc des interruptions souvent longues. Ce sont paradoxalement les archives anciennes qui disposent encore le plus d'information.

3.3.1.3 – Les autres sources statistiques

Nous avons pu collecter d'autres données quantitatives recouvrant le champ de la navigation maritime et les accidents en mer gelée en particulier. Ainsi, nous avons effectué des traitements statistiques portant sur :

- les restrictions du trafic hivernal. Effectivement, le gel intense des eaux marines entraîne souvent la mise en place de restrictions à la navigation dans les différents ports côtiers. Les données statistiques de début et de fin des restrictions à la navigation dépendant de la classification des navires sont publiées par le FIMR. Les principaux ports finlandais de la Baie de Botnie figurent dans ces séries de données.
- les accidents et incidents en mer gelée. De nombreuses données sur le nombre et le type d'accidents ont été collectées auprès de la station des garde-côtes de

Virpiniemi dont l'action rayonne en Baie de Botnie. Les chiffres reflètent les constats faits sur les dernières décennies.

- enfin, de nombreuses statistiques concernent de façon plus générale la navigation maritime. Elles prennent en compte le trafic maritime (navires entrant et sortant) à diverses périodes de l'année, l'import-export, l'usage du brise-glace... principalement pour les ports d'Oulu et de Riga.

3.3.2 – Les traitements statistiques de données qualitatives

Afin d'étudier et de quantifier les comportements sociétaux face à la présence des glaces de mer, nous avons mis en place une enquête portant sur la fréquentation de la banquise et les activités humaines qui y sont pratiquées en hiver. Ce questionnaire était destiné aux populations côtières d'Oulu et de Riga.

Dans les deux cas, des difficultés de communication et de compréhension liées à la langue se sont présentées ne permettant malheureusement souvent que trop peu de réponses aux questions posées aux individus interrogés dans la rue. En Finlande, chez de nombreux individus, nous est curieusement apparu le refus de répondre à une enquête se voulant pourtant anonyme et ceci malgré la maîtrise aisée de la langue anglaise pour la majorité de la population. À Riga le problème fut tout autre, ne concernant pas une réticence d'ordre culturel à la communication, mais plus simplement un profond blocage de la barrière de la langue. La nécessité de l'usage d'une tierce personne pour nous assister linguistiquement dans nos démarches d'enquête s'est souvent révélée assez laborieuse.

Par conséquent, pour faire face à ces difficultés d'enquête, nous avons eu recours aux nouvelles technologies d'information et de communication qui ont permis de diffuser l'enquête *via* le courrier électronique. En définitive, les informations collectées portent sur 105 questionnaires remplis anonymement pour le littoral d'Oulu et 100 pour celui de Riga. Bien entendu, le traitement statistique des réponses en a découlé.

3.4 – LA REPRESENTATION SPATIALE DES PHENOMENES OBSERVES

Une démarche importante et chère aux géographes est la spatialisation des phénomènes. Dans le cadre de ce travail, la spatialisation se présente sous différentes formes : l'illustration par les images satellitaires et la cartographie.

3.4.1 – Usage de la télédétection en tant qu'outil de spatialisation

La vue satellitaire est un outil d'efficacité incroyable et de suivi pour l'observation des processus et dynamiques naturels sur la Terre. Ainsi, dans l'objectif d'analyser et de spatialiser les processus glaciels au sein de la Mer Baltique, il a semblé intéressant de faire appel à l'exploitation des données de la télédétection par satellite. Dans le cadre de cette recherche, il n'a pas été question de faire du traitement d'images puis qu'elles ont toutes été préalablement traitées par les organismes de recherche qui nous les ont fournies. Il s'est agi en fait de collecter et d'interpréter géographiquement ces images traitées. La télédétection est ainsi utilisée ici comme outil de spatialisation des processus glaciels. Deux types d'images sont exploités dans cette étude : les images Envisat et MODIS.

3.4.1.1 – Les images Envisat

En mars 2002, l'Agence Spatiale Européenne (ESA) met en orbite le satellite Envisat consacré à l'observation de la Terre. Conçu pour fournir des informations sur l'état de l'atmosphère, de l'océan, de la terre et du couvert de glace, Envisat a pour mission d'assurer la continuité des observations faites par les satellites ERS (Wehr et Attema, 2001, 83) au cours des années 1990. Il a comme principaux objectifs de collecter des données sur l'environnement terrestre à une échelle globale pour une période de temps longue afin que des tendances se dégagent, et sur l'amélioration des capacités de surveillance et de gestion des ressources de la Terre. Il contribue aussi à une meilleure connaissance des processus « solides » de la Terre (Gardini et *al.*, 1995, 301). Afin d'atteindre ces objectifs, Envisat est doté de dix instruments scientifiques (annexe 6) dont MERIS qui est à l'origine des images satellitaires utilisées dans le cadre de cette étude.

L'instrument MERIS (*Medium Resolution Image Spectrometer*) permet de mesurer les radiations solaires réfléchies par la Terre, à une résolution spatiale au sol de 300 mètres en 15 bandes spectrales dans le visible et le proche infrarouge. La principale mission de MERIS est d'évaluer la couleur des eaux océaniques et des zones côtières.

Les images Envisat utilisées dans cette recherche ont été fournies par le Département de Géophysique de l'Université d'Helsinki dont le personnel a préalablement traité les images dans le cadre du programme de recherche "*Snow and ice in North Europe*" (ENVISAT-AO 455). Pour cette étude, les résultats obtenus sont ainsi exploités grâce à l'utilisation du logiciel BEAM qui permet de visualiser, d'analyser et de traiter des images Envisat. L'interprétation des images sur lesquelles figurent les golfes de Botnie et de Riga porte ici essentiellement sur les mois de mars et de mai 2003.

3.4.1.2 – Les images MODIS

L'instrument MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) est un radiomètre qui permet une meilleure connaissance des dynamiques et processus globaux sur la terre, dans les océans et dans l'atmosphère. MODIS est constitué de deux satellites Terra et Aqua lancés respectivement en 1999 et 2002 par la NASA. Le satellite Aqua dont les images proviennent ici, a pour mission de collecter des informations sur l'évaporation des océans, la vapeur d'eau dans l'atmosphère, les glaces de mer, la couverture neigeuse... Les images collectées ici recouvrent les périodes d'englacement des années 2004 à 2007 et intéressent principalement le Golfe de Riga.

3.4.2 – La représentation cartographique

La cartographie qui figure dans le présent travail repose sur le traitement de données cartographiques déjà existantes comme les cartes topographiques ou sur l'interprétation de résultats obtenus au cours de la recherche.

Ainsi, nous avons eu recours à l'utilisation de cet outil informatique qu'est le système d'information géographique (SIG). En effet, le SIG nous a permis d'organiser et de présenter des données d'une information provenant de sources différentes à travers un même référentiel spatial. Le recensement de cartes à échelles géographiques et à dates différentes a suscité un important travail de géoréférencement afin d'affecter une référence spatiale commune à toutes les images dans une projection géographique donnée. Pour cela, on a fait appel au logiciel cartographique ArcMap du groupe ArcGIS. Ce logiciel a permis de réaliser des cartes thématiques et surtout de présenter l'évolution du trait de côte dans la Baie de Botnie.

La spatialisation de certains phénomènes a amené à explorer et utiliser d'autres types de cartes de nature diverse. Les cartes bathymétriques sont essentielles non seulement pour une meilleure visualisation des profondeurs marines mais aussi pour une bonne compréhension du fonctionnement de la navigation maritime et de son environnement (chenaux, phares...). D'autre part, les cartes des conditions de glace publiées par le FIMR et le SMHI forment un ensemble de documents indispensables à la spatialisation des différentes phases de formation et de disparition de la banquise ainsi que de la nature et des types de glaces formées. Ces cartes sont recensées ici depuis le début des années 1980.

Enfin, plusieurs cartes ont été réalisées à partir des résultats obtenus ou des phénomènes observés concernant notamment l'englacement des eaux de la Mer Baltique ou encore les risques en mer gelée.

3.5 – LIMITES ET CRITIQUE DES SOURCES

La collecte des données s'est déroulée, globalement, dans des conditions favorables mais non pas sans encombre. Comme on l'a déjà mentionné, il a fallu avant tout s'adapter à de nouveaux milieux géographiques étrangers, à de nouvelles cultures et essayer de comprendre le fonctionnement de chaque pays. Mais, outre cela, certains obstacles ont gêné nos recherches tels les problèmes de langage et parfois l'accès aux données.

3.5.1 – Les problèmes linguistiques

Le finnois et le letton sont des langues, certes jolies à écouter, mais difficiles à comprendre quand on ne les a jamais étudiées. Les missions de terrain accomplies en Finlande et en Lettonie dans le cadre de cette recherche nous ont alors amené à nous exprimer et à travailler en anglais, langue la plus usitée dans le milieu scientifique et souvent auprès du public. Toutefois, la langue a souvent constitué un premier obstacle à la collecte d'information : à cet égard, la prise de contact a été beaucoup plus aisée en Finlande qu'en Lettonie.

La Finlande a deux langues officielles : le finnois et le suédois. Mais la plupart des Finlandais comprennent et parlent l'anglais, ce qui nous a facilité la tâche. Du point de vue de la communication orale, aucun problème n'est survenu au contact des employés d'organismes scientifiques, des administrations maritimes et autres. Cependant la population locale a montré quelquefois une certaine réticence à répondre aux enquêtes. En revanche, la lecture de documents n'a pas été sujette à de grosses difficultés de compréhension puisque beaucoup de travaux sont rédigés ou traduits en langue anglaise. Les quelques documents publiés en langue finnoise ont cependant mérité une traduction.

En revanche, en Lettonie, le poids de l'histoire mais surtout de la russification se fait encore ressentir. Dans ce jeune état indépendant, la plupart des Lettons parlent le russe. Cependant, afin de se détacher de la Russie et de son empreinte, les jeunes préfèrent de nos jours se tourner vers l'anglais. Et pourtant, même s'il existe une réelle volonté de s'ouvrir à d'autres cultures, il a été néanmoins difficile pour nous de communiquer en Lettonie. La langue a constitué une réelle barrière scientifique à

l'avancée de notre recherche. Il faut toutefois relativiser en précisant que les entretiens avec le personnel des établissements scientifiques et administrations maritimes se sont déroulés sans difficulté particulière, même si la présence d'une tierce personne employée à la LEGMA était plutôt recommandée le cas échéant. En revanche, la prise de contact avec la population locale n'a pas été aisée. La plupart des données recueillies figuraient en letton, russe ou allemand ; elles ont ainsi nécessité une traduction immédiate des documents (cartes, tableaux, récits courts...) par le personnel de l'agence qui nous a accueillie.

3.5.2 - L'accès aux données

L'accès aux données est en quelque sorte lié aux problèmes de communication et au contexte culturel du pays. Autant dire qu'il n'a pas toujours été simple, surtout en Lettonie. En effet, la présence d'une tierce personne lors de mes entretiens et déplacements ne répondait pas seulement au problème de la langue, mais elle permettait à l'évidence de filtrer également les données susceptibles d'être recueillies. Ainsi l'accès aux données au sein des archives de la LEGMA était très surveillé : un membre du personnel était toujours présent pour la quête d'information (officiellement afin de pallier les problèmes linguistiques qui se posaient). Même si les documents fournis correspondaient à notre demande, il est certain que de nombreux documents n'ont pas pu être consultés. Il a fallu donc faire preuve d'insistance et de persévérance dans notre quête.

D'autre part, on notera la carence de publications sur diverses questions environnementales telle l'érosion littorale en Lettonie. Elle trouve son explication dans l'histoire récente puisque, pendant l'époque soviétique, les scientifiques lettons avaient quelques problèmes pour consulter la littérature étrangère et rédigeaient alors en russe. Ce n'est qu'en 1994 que certaines études de géomorphologie littorale ont commencé à être publiées en langue anglaise par les Lettons.

3.6 - CONCLUSION

Une recherche menée à l'étranger est assez complexe car elle demande à la fois un investissement total du point de vue linguistique, d'une part, et scientifique, d'autre part, sachant que la durée de chaque mission de terrain est évidemment bien déterminée ; et un effort primordial d'intégration dans la société. Elle est donc intéressante et enrichissante puisqu'elle permet d'acquérir des connaissances inédites sur les modes de

fonctionnement universitaires et scientifiques, autant que sur le vécu quotidien des sociétés.

Une seule mission de terrain n'aurait certes pas suffi à atteindre les objectifs méthodologiques fixés, particulièrement celui de la phase de collecte des données. Ainsi, il a fallu plusieurs séjours en Finlande et Lettonie pour collecter un monceau de données qu'il a fallu ensuite trier, classer, traiter et mettre en rapport les unes avec les autres. Mêlant à la fois les approches qualitatives et quantitatives, cette démarche géographique a permis au fur et à mesure de faire évoluer et de mettre en interrelation les différents éléments composant le système, au centre duquel se trouve notre objet d'étude, les glaces de mer.

Partie 2

Les glaces de mer

Chapitre 4

Les caractéristiques glacielles côtières et marines

- 4.1 – L’englacement saisonnier de la Mer Baltique
- 4.2 – Les caractéristiques glacio-marines des eaux des Golfes de Botnie et de Riga et leur variabilité spatio-temporelle
- 4.3 – Les apports des eaux continentales
- 4.4 – Conclusion

Chapitre 5

La relation des phénomènes glacio-marins avec le climat et la météorologie

- 5.1 – Quelques rappels des conditions climatiques hivernales en Mer Baltique
- 5.2 – L’influence des forçages atmosphériques et thermiques sur l’englacement des espaces marins de la Mer Baltique
- 5.3 – La banquise, comme élément majeur du système climatique de la Mer Baltique
- 5.4 – L’originalité du cas de la Mer Baltique : l’intérêt d’une comparaison avec la Baie d’Hudson
- 5.5 – Conclusion : la particularité de la Mer Baltique

Chapitre 6

L’action des glaces de mer sur la morphologie littorale

- 6.1 – L’érosion littorale en Mer Baltique
- 6.2 – La part de l’action des glaces de mer dans l’érosion littorale en Mer Baltique
- 6.3 – Conclusion

On le sait, l'eau à l'état solide se présente sur la Terre sous trois formes : les glaciers continentaux qui constituent le principal stock de glace mondial (avec principalement les inlandsis du Groënland et de l'Antarctique), les glaces de sol qui forment alors le pergélisol, et bien sûr les glaces de mer. Dans le cadre de notre étude ce sont bien entendu les glaces de mer qui retiennent particulièrement notre attention.

Les glaces mer sont composées de la banquise permanente (en Arctique et en Antarctique) et saisonnière (en Mer Baltique et dans d'autres mers subpolaires). Qualifiée de « *mince coquille d'œuf* » par Marie-Françoise André (2005, 11), la banquise, de quelques dizaines de centimètres à plusieurs mètres d'épaisseur, peut laisser place aux glaces flottantes au moment de la débâcle printanière. Au cœur de l'hiver, les glaces de mer recouvrent à elles seules plus de 15 millions de kilomètres carrés dans l'hémisphère Nord et 19 millions en Antarctique (Programme des Nations-Unies pour l'Environnement, 2000, 178). Autant dire qu'elles jouent un rôle important dans le climat mondial et dans les interactions mer-atmosphère. Leur intérêt grandissant se traduit par la multiplication des données acquises sur leur comportement actuel, souvent associé au « réchauffement » contemporain et par les nombreuses hypothèses qui se développent sur leur devenir proche ou lointain.

Toutefois, les glaces de mer de la Baltique présentent des caractères particuliers qui leur sont propres du fait de la position et de l'environnement géographique de l'espace marin considéré. Ce sont alors leurs caractéristiques glacielles marines et côtières ainsi que leur variabilité spatio-temporelle qui nous intéresseront dans un premier temps avant d'établir la force de leur relation avec les variables climatiques et météorologiques. Car il faut le rappeler, les glaces de mer sont le fruit de processus climatiques et hydrologiques. Enfin, nous nous interrogerons sur les impacts de la formation et de la disparition annuelles de la banquise sur l'évolution actuelle des littoraux de la Mer Baltique.

Les caractéristiques glacielles côtières et marines

La saison glacielle se traduit par la congélation des eaux marines pour une période de quelques mois. Elle peut être définie d'après diverses caractéristiques qui déterminent l'ampleur, la durée et l'épaisseur du phénomène. L'ampleur du phénomène cryomarin s'apprécie ainsi par l'évaluation de l'extension maximale de la surface englacée de la Mer Baltique qui exprime la situation glacielle de la totalité du bassin. À une échelle locale, le phénomène se mesure par la durée du cycle glaciaire qui se base sur les dates de prise en glace et de fonte, et par l'importance de l'épaisseur de la couche de glace. À côté de toutes ces caractéristiques, il faut également considérer les apports en eau terrestre qui ont une influence notable sur la salinité et le gel des eaux côtières proches des embouchures des cours d'eau.

4.1 – L'ENGLACEMENT SAISONNIER DE LA MER BALTIQUE

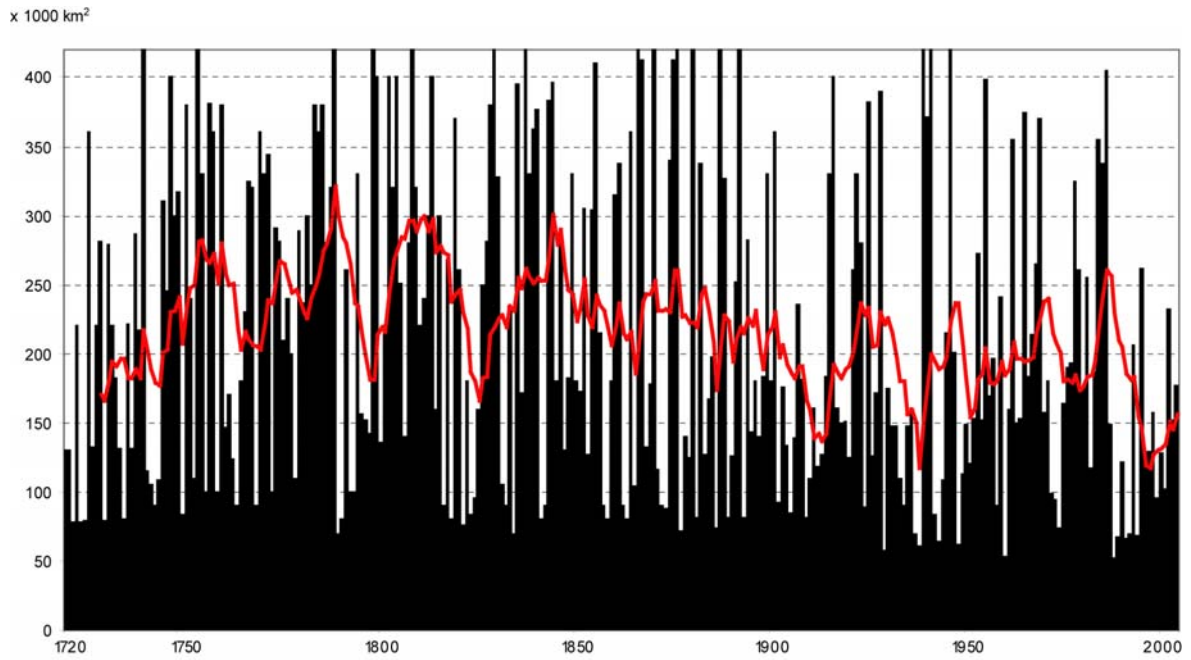
L'englacement de la Mer Baltique est un phénomène saisonnier dont la probabilité d'occurrence équivaut annuellement à 100%. Cependant, les variations interannuelles de ces caractéristiques glacielles sont larges. En effet, au cours du siècle passé, malgré une extension maximale moyenne d'environ 50%, la surface de la banquise a varié de 12 à 100 % et le cycle glaciaire de quatre à sept mois (Leppäranta, 1993, 5). La variabilité interannuelle de l'extension maximale de la glace a ainsi fait l'objet de nombreuses études (Jurva, 1952b ; Alenius et Makkonen, 1981 ; Leppäranta et Seinä, 1985 ; Seinä et Palosuo, 1996 ; Tinz, 1996 ; Omstedt et Chen, 2001). De plus, la progression spatiale de la prise en glace n'est pas aléatoire mais contrôlée par des facteurs de forçage (température, vents, courants...) qui seront étudiés dans le prochain chapitre. Il s'agit tout d'abord de décrire ici spatialement les processus glacio-marins ainsi que le cycle de la banquise de sa formation jusqu'à la disparition des dernières glaces flottantes.

4.1.1 – L’extension maximale de la surface englacée de la Mer Baltique

Les plus anciennes données disponibles ont permis de reconstituer l’extension maximale du couvert de glace en Mer Baltique depuis l’hiver 1720 jusqu’à nos jours. Ces données reposent sur l’enquête historique de R. Jurva pour les hivers 1720 – 1940 et sur le matériel fourni par le Service des glaces du FIMR pour les hivers 1941 - 2005.

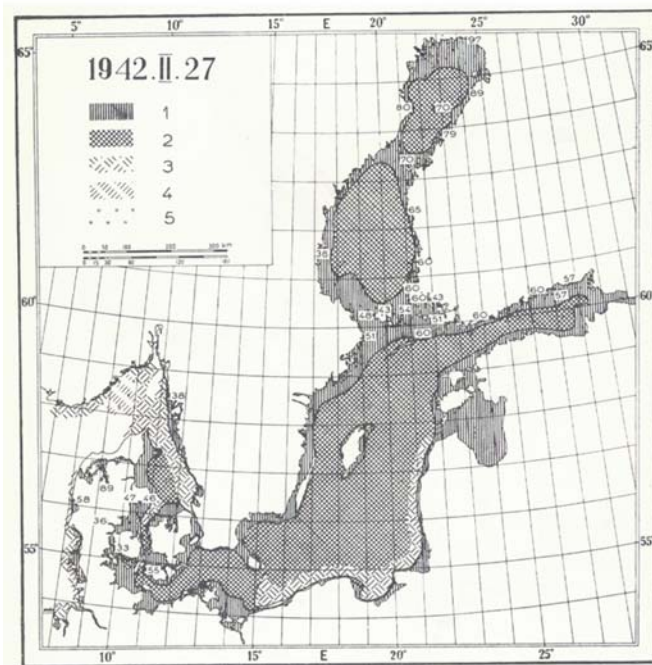
Dans les années 1920 et 1930, le Professeur R. Jurva, alors directeur du département des glaces du FIMR, commença la collecte de données sur l’histoire des conditions de glace en Mer Baltique (Seinä, 1993, 88). Au début du XX^{ème} siècle, les données sur les conditions de glace étaient recueillies par les navires, les brise-glaces et plus tard lors de survols aériens. Pour les XVIII^{ème} et XIX^{ème} siècles, en revanche, R. Jurva a exploité diverses sources dont les « journaux de bord » des phares de la côte finlandaise qui contenaient des informations sur les glaces marines. Pour les données plus anciennes, ce scientifique a analysé de vieux journaux papier relatant d’importantes informations sur les conditions de glace ainsi que les journaux et carnets de bord de voyageurs. À l’aide de la classification de la sévérité des hivers 1205-1916 établie par Easton en 1928 (Seinä et Palosuo, 1996, 80), et des informations collectées sur les conditions de glace, R. Jurva a reconstitué cartographiquement l’extension maximale du couvert de glace. Depuis, le Service des glaces de Finlande (FIMR) a poursuivi ce travail et évalue systématiquement chaque année l’étendue de la couverture glacielle.

Le graphique 1 établi ci-après montre ainsi le suivi chronologique de l’extension maximale du couvert de glace en Mer Baltique de 1720 à 2008. La variabilité du phénomène y est claire : elle varie de 49 000 km² à 420 000 km², soit de 11,7% à 100% de la surface totale. La moyenne mobile (courbe rouge) établie sur 10 ans confirme bien ces variations. Les hivers 1942 et 1989 sont très représentatifs de cette variabilité (cartes 17a et 17b). En effet, la Mer Baltique a été complètement prise en glace pendant l’hiver 1942, dernier hiver à avoir connu un pourcentage d’englacement aussi fort, alors qu’en 1989, seules les eaux marines du Golfe de Botnie ainsi que celles du fond du Golfe de Finlande ont gelé.



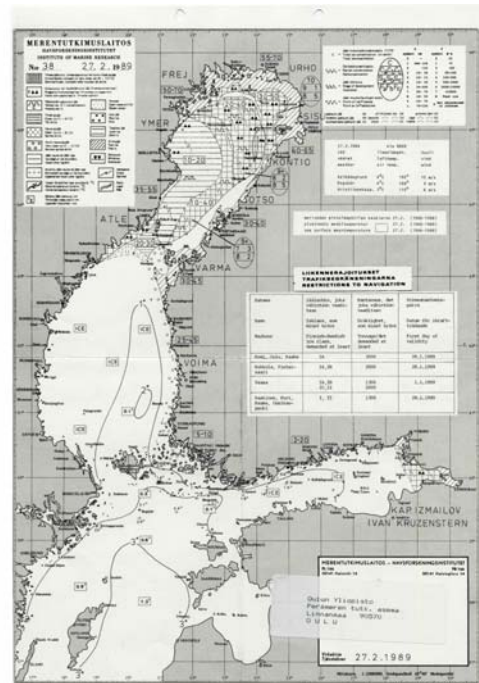
Réalisé par Élise Lépy
d'après Seinä et Palosuo, 1996 ; Seinä et al., 2001 ; Seinä et al., 2006

Graphique 1 - Extension maximale de la surface englacée en Mer Baltique, et moyenne mobile (sur 10 ans) pour la période 1720-2008
Graph 1 – Maximum ice extent of the Baltic Sea and 10-years moving average for the period 1720 - 2008



Source : Palosuo, 1953, 89

a. En 1942, un hiver des plus sévères du XXème siècle



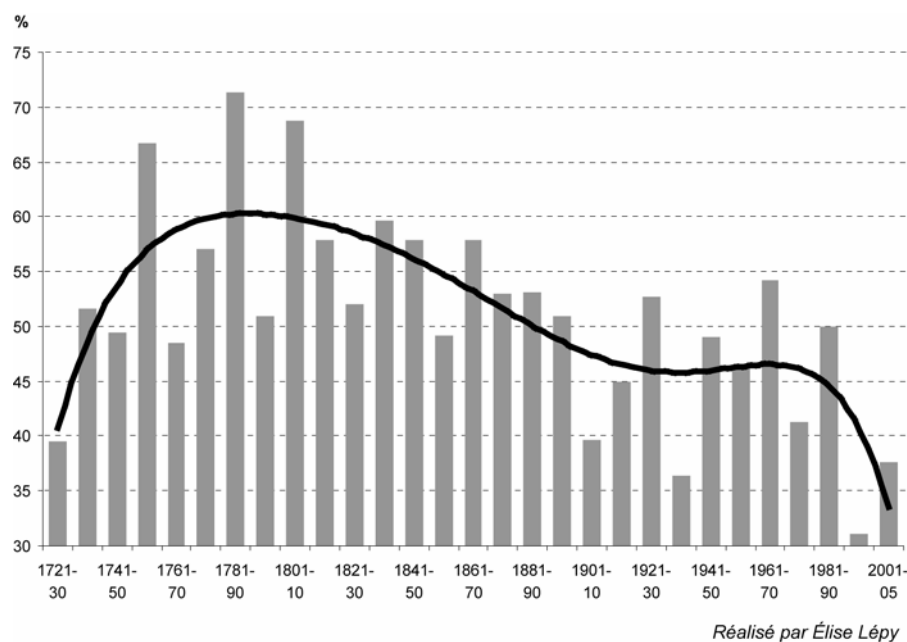
Source : Finnish Institute of Marine Research

b. En 1989, un hiver extrêmement modéré

Cartes 17 - Des états opposés de l'englacement en Mer Baltique
Map 17 – Different states of the Baltic Sea ice cover

Lars Axell et Katarina Lindquist (2007) ont ainsi récemment reconstitué l'extension maximale du couvert de glace depuis 1660 grâce à l'analyse statistique des données météorologiques de températures hivernales de l'air enregistrées en Suède. D'après les auteurs, la fin du XVII^{ème} siècle aurait connu une augmentation de la surface englacée de la Mer Baltique suivie d'une légère diminution au début du XVIII^{ème} siècle, dont on peut apercevoir la fin sur le graphique 1.

Cependant, plusieurs tendances générales se dégagent. Elles se distinguent sur le graphique 2 qui rappelle le pourcentage de la surface englacée par décennie depuis le XVIII^{ème} siècle. Pendant la fin du Petit Âge Glaciaire, période climatique froide survenue jusqu'à l'aube du XX^{ème} siècle, les glaces de mer recouvraient souvent plus de la moitié de la Mer Baltique malgré une tendance négative enregistrée jusque dans la première moitié du XX^{ème} siècle. Mais, vers les années 1930, la tendance a montré une variation faible et légèrement positive jusque dans les années 1970 qui s'est effondrée ces dernières années.



Graphique 2 – Pourcentage de la surface englacée de la Mer Baltique (420 000 km²) par décennie
 Graph 2 – Distribution of the Baltic Sea ice cover (420 000 km²) per decade

Si l'englacement de la Mer Baltique est ainsi très variable d'un hiver à un autre, la prise en glace et la fonte des eaux marines se produisent tout de même chaque année prenant en compte les conditions d'englacement (faible profondeur, faible salinité ...). La probabilité d'occurrence de la glace est de 100% dans la Baie de Botnie et dans le fond du Golfe de Finlande, de 50% dans le Nord de la Baltique Propre et de 10% dans le Sud de la Baltique (Seinä, 1993, 87). Ainsi, la Baie de Botnie, espace d'étude le plus septentrional, a, depuis que des mesures précises sont effectuées, toujours pris en glace l'hiver

contrairement au Golfe de Riga qui peut connaître une glaciellisation partielle de ses eaux : par exemple, seule la Baie de Pärnu a gelé pendant l'hiver 2008.

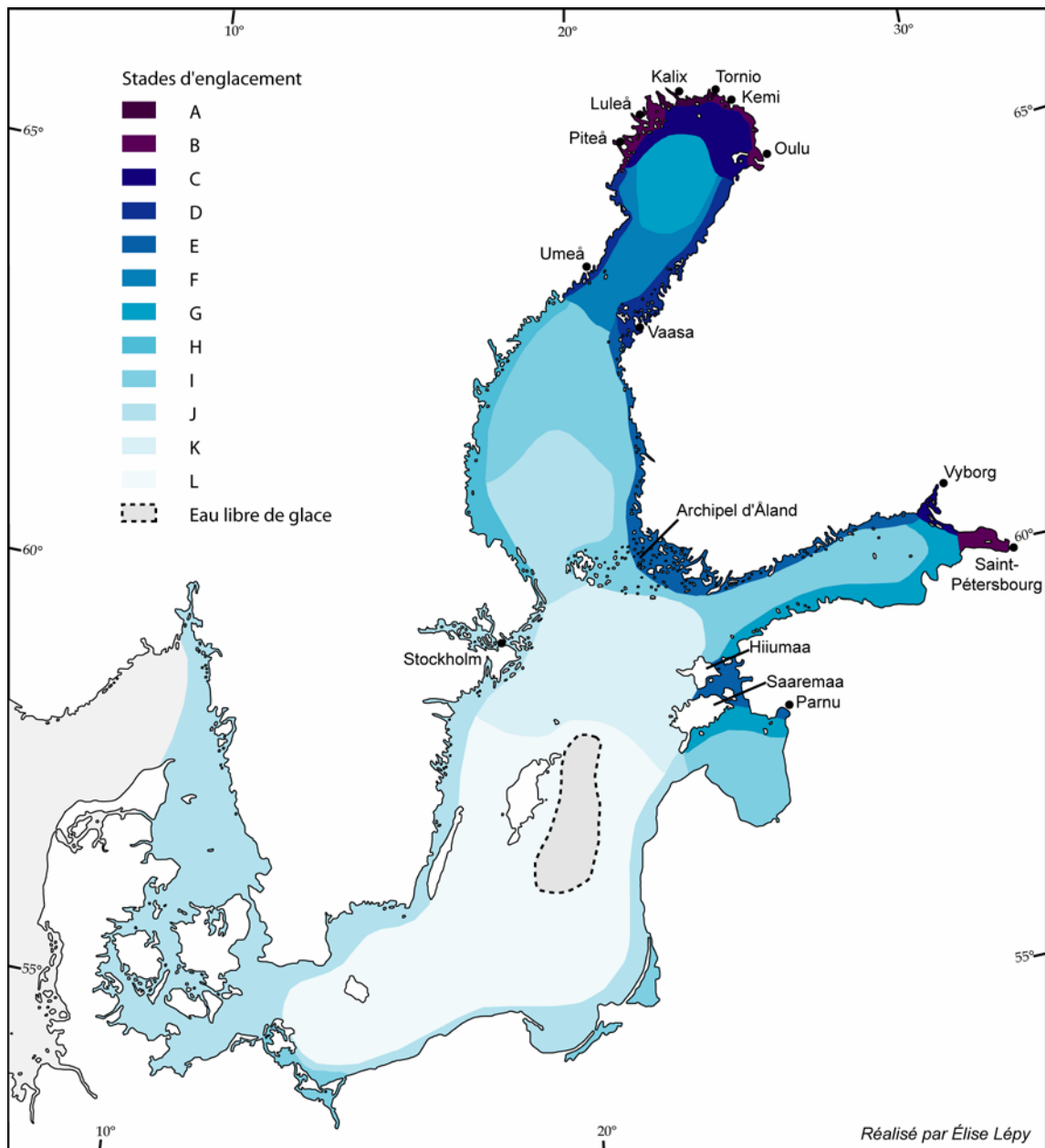
4.1.2 – Description spatiale des processus de prise en glace et de fonte des eaux marines de la Baltique

L'englacement de la Mer Baltique débute là où l'eau est peu profonde, dans les petites baies et les nombreux archipels de ses côtes (carte 18). Le Golfe de Botnie est la partie de la Mer Baltique qui offre le maximum d'englacement : c'est là que les premières glaces des étendues d'eau peu profondes proches de Kalix et de Tornio se forment (stade A) alors que la température des eaux du fond du Golfe de Finlande est supérieure en moyenne de 3°C, et celles du Golfe de Riga de 6°C. Les archipels des côtes finlandaises (Kemi, Oulu) et suédoises (Luleå, Piteå) prennent ensuite en glace, de même que la Baie de la Neva (Saint-Petersbourg) (stade B). L'englacement se poursuit vers le centre de la Baie de Botnie avec un gel plus prononcé de sa façade orientale, et à la même période la baie de Vyborg est recouverte d'une banquise côtière (stade C). Pour des raisons météorologiques, les eaux littorales finlandaises du Golfe de Botnie gèlent plus rapidement que les eaux littorales suédoises. Une banquise côtière se forme donc sur la totalité de la côte finlandaise de la Baie de Botnie jusqu'à Vaasa (stade D). Par la suite, l'embâcle des eaux des baies et archipels des côtes finlandaises de la Mer de Botnie débute, de même que celles de l'archipel d'Åland (stade E). Dans le Golfe de Finlande, la côte Nord très découpée et composée de nombreux archipels est plus favorable à l'englacement que la côte estonienne qui est plutôt rectiligne. Ses eaux littorales prennent en glace en même temps que les eaux du Nord-Est du Golfe de Riga dont l'englacement est facilité par la présence des îles estoniennes d'Hiiumaa et Saaremaa et des hauts-fonds, ainsi que celles de la Baie de Pärnu (stade E). Dans le Golfe de Botnie, le seuil du Quark (Umeå – Vaasa) est recouvert de glace fixe et permet ainsi à la Baie de Botnie d'être gelée dans sa quasi-totalité : seul le centre de la baie n'est encore recouvert de glace (stade F). De plus, la glace de dérive située au centre de la baie reste peu mobile à cause de la prise en glace du Quark. Le prochain stade d'englacement de la Mer Baltique conduit à l'englacement total de la Baie de Botnie, la prise en glace de la côte estonienne du Golfe de Finlande et du Nord du Golfe de Riga (stade G). La Mer de Botnie, plus méridionale et plus profonde continue l'embâcle de ses eaux le long des côtes suédoises (stade H). Le Nord de la Mer de Botnie qui ne porte que de la glace de dérive plus ou moins abondante, les Golfes de Finlande et de Riga ainsi que l'archipel d'Åland et les baies des côtes polono-allemandes sont ensuite totalement prises en glace (stade I). La Baltique Centrale est moins favorable à l'englacement que les trois golfes du fait de sa plus grande profondeur et de ses côtes moins découpées. Cependant les archipels de la côte suédoise (Stockholm) permettent la formation d'une banquise côtière alors qu'elle est moindre du côté letton

(stade J). Au même moment, pendant les hivers rudes, les détroits danois connaissent un englacement plus important (stade J) qu'en Baltique Propre car les conditions y sont plus favorables : les nombreuses baies sont de faibles profondeurs et la stratification des eaux marines présente une couche supérieure d'eau peu salée. Le Skagerrak connaît aussi une prise en glace littorale. Les détroits danois peuvent connaître 50 à 60 jours de glace pendant les hivers les plus sévères (Guilcher et Beaujeu-Garnier, 1958, 140). Enfin, l'entrée des trois golfes (stade K) et la Baltique Propre peuvent geler durant les hivers extrêmement sévères laissant toutefois son centre où les eaux sont profondes libre de glace (stade L).

À l'échelle de la Mer Baltique, la débâcle se fait à l'inverse : les eaux qui ont pris en glace les dernières sont ainsi les premières à dégeler. La Baltique Propre connaît une débâcle précoce suivie des Golfes de Riga et de Finlande, puis de la Mer de Botnie et enfin de la Baie de Botnie qui fin mai peut être parsemée de glaces flottantes en dérive. La présence de ces dernières ne s'explique qu'à une échelle locale car certaines côtes peuvent connaître la débâcle avant les eaux plus profondes en mer car elles sont sous l'influence des eaux de fonte terrestres : c'est le « *détachement de terre* » (Guilcher et Beaujeu-Garnier, 1958, 141).

Comme nous venons de l'évoquer, les eaux marines de la Baltique passent donc d'un état liquide à un état solide sur une période s'étalant de quelques jours à quelques mois. Ces eaux connaissent une véritable transformation de leur état : c'est le cycle de la glace de mer.



Carte 18 – Les stades d’englacement en Mer Baltique
 (synthèse établie à partir de plusieurs cartes des conditions de glace et de documents écrits)
 Map 18 – Ice cover stages of the Baltic Sea
 (synthesis made from several ice maps and written sources)

4.1.3 – Le cycle de la glace de mer

De l’automne au printemps, les eaux marines de la Baltique connaissent un changement profond de leur état. Ainsi, le cycle de la glace se divise en quatre étapes détaillées dans le tableau 6 : sa formation, sa croissance, sa déformation et sa fonte.

En premier lieu, la prise en glace de l’eau de mer se fait sous une condition : l’atteinte du point de congélation. La température de congélation de l’eau douce au repos est de 0°C. En revanche, l’eau de mer étant salée, sa température de congélation est

inférieure à 0°C. Cette dernière varie en fonction inverse du degré de salinité : plus l'eau est salée, plus le point de congélation est bas. Autrement dit, les eaux du Nord du Golfe de Botnie qui ont un taux de salinité moyen de 3 ‰ gèlent plus rapidement que celles du fond du Golfe de Riga dont le taux de salinité moyen est compris entre 7 et 8 ‰. De plus, la glace se forme plus facilement dans les eaux peu profondes puisque le volume d'eau à refroidir est moindre. Les premiers signes de prise en glace de l'eau de mer se distinguent par la formation de cristaux de glace qui, en quantité suffisante, forme le *slush*, une gadoue flottante. Par la suite, la gadoue s'épaissit et la couche de glace de quelques centimètres appelée *nilas*, ondule facilement sur les vagues jusqu'à la formation de véritables glaces flottantes. Ainsi, pendant la période de formation du couvert de glace, les *glaces en crêpes* (*pancake ice*) puis les *floes*, fragments beaucoup plus grands, se forment afin de constituer la banquise côtière qui reste fixe à la côte et qui, au cours de l'hiver, ne subira pas ou peu de déformations. Après que la couche initiale de glace se soit formée, elle s'épaissit formant le pack de glace.

Phases	Agents	Types de glace	Lieu
Formation	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Point de congélation</i> : Eau < 0°C (eau douce) Plus l'eau est salée plus le point de congélation est bas • <i>Profondeur</i> 	<ul style="list-style-type: none"> - gadoue (<i>slush</i>) - nilas - glace en crêpes (<i>pancake ice</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> - près des côtes - baies et étendues d'eau peu profondes
Croissance	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Épaississement</i> : - taux de croissance rapide au début - congélation des couches d'eau inférieures à la glace • <i>Chevauchement</i> : rencontre de floes 	<ul style="list-style-type: none"> - floes → formation d'une banquise côtière (<i>fast ice</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> - des côtes vers le large
Déformation / Ouverture	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Pression exercée par la force du vent et les courants marins</i> • <i>Expansion thermique</i> : dilatation et contraction de la glace selon les variations des températures de l'eau 	<ul style="list-style-type: none"> - hummocks (<i>hummocked ice</i>) - chevauchement de glace (<i>rafted ice</i>) - fractures : fissures, chenaux, polynies - crêtes de pression (<i>ridged ice</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> - en mer
Fonte	<ul style="list-style-type: none"> • Température de l'eau > point de congélation • <i>Rayonnement solaire</i> : - absorbé : élévation de la température de l'eau - réfléchi : albedo • <i>Conduction</i> de la chaleur de l'air à l'eau 	<ul style="list-style-type: none"> - mares - trous de fonte 	<ul style="list-style-type: none"> - totalité de l'étendue d'eau prise en glace

Réalisé par Élise Lépy

Tableau 6 – Le cycle de la glace de mer
(synthèse d'après de nombreux travaux)
Table 6 – Sea ice cycle

L'épaississement se fait par congélation des couches d'eau situées au-dessous de la couche de glace. Au début de la prise en glace, le taux de croissance peut être très rapide puis il ralentit très nettement. Une couche de glace peut aussi croître lorsque des floes se joignent. Mais, bien entendu, au cœur de l'hiver, il n'est pas rare que les étendues d'eau englacées soient sujettes à des conditions hydrométéorologiques responsables du mouvement des glaces.

Ainsi les pressions exercées par le vent voire les tempêtes et par les courants marins sont responsables des déformations et ouvertures aux dépens du pack de glace. C'est ainsi que des *hummocks*, monticules de glace brisée par la pression, peuvent se former en mer. Il n'est pas rare non plus que, les glaces se chevauchent (*rafted ice*) et déforment le couvert. Les *fractures* et les *crêtes de pression* sont le résultat du mouvement de la glace par la force exercée par le vent et les courants marins autant que celui de l'expansion thermique : la dilatation puis la contraction de la glace par refroidissement puis réchauffement de l'eau marine, induisent ainsi des déformations de la couche de glace. Des crêtes de pression se forment à la surface. Dans la Baie de Botnie, la probabilité d'occurrence de ces crêtes atteint 90 à 100% en mars, faisant augmenter l'épaisseur de glace de 6 à 14 centimètres (Kankaanpää, 1997, 139). En Mer Baltique, les crêtes de pression les plus méridionales se localisent aux latitudes de l'île de Gotland et du Golfe de Riga. Par la suite quand la glace a commencé à se contracter il se forme des fractures (fissures, chenaux, polynies) qui peuvent regeler par basses températures. Après s'être formée, la glace de mer se déforme constamment, changeant de forme et de dimension, puis se désintègre finalement en fondant.

La fonte de la glace de mer requiert une température de l'eau supérieure à son point de congélation. La chaleur nécessaire à la fonte des glaces provient de deux sources principales : l'absorption du rayonnement solaire et la conduction de chaleur de l'air à l'eau. Une partie du rayonnement solaire est absorbée par la surface qu'il atteint, sachant que la glace a une surface réfléchissante dont l'albedo devient fort quand elle est recouverte de neige. Plus la neige est fraîche, plus son pouvoir réfléchissant augmente jusqu'à atteindre 0,90. En revanche toutes les poussières et autres impuretés s'accumulant à la surface de la glace ont un albédo très faible et elles agissent comme point de départ de la fonte. Des *mares* se forment, s'étendent puis se creusent jusqu'à l'apparition d'eau libre. Ces *trous de fonte* se réchauffent par rayonnement et la glace environnante absorbe la chaleur de l'eau par conduction. Par la suite la désintégration de la couche de glace se fait rapidement.

À titre d'exemple, l'image satellitaire 1 propose un état de la banquise au moment de la débâcle des eaux marines de la Baie de Botnie en mai 2003. La banquise côtière, toujours présente, est soudée au rivage. En revanche, dans le centre de la Baie, la banquise a laissé place à des glaces flottantes qui circulent dans l'eau libre. Sur la côte

Ouest de la Baie, un chenal traversant la banquise apparaît : l'ouverture s'est faite grâce aux apports d'eau de fonte terrestre du fleuve côtier Luleälven.

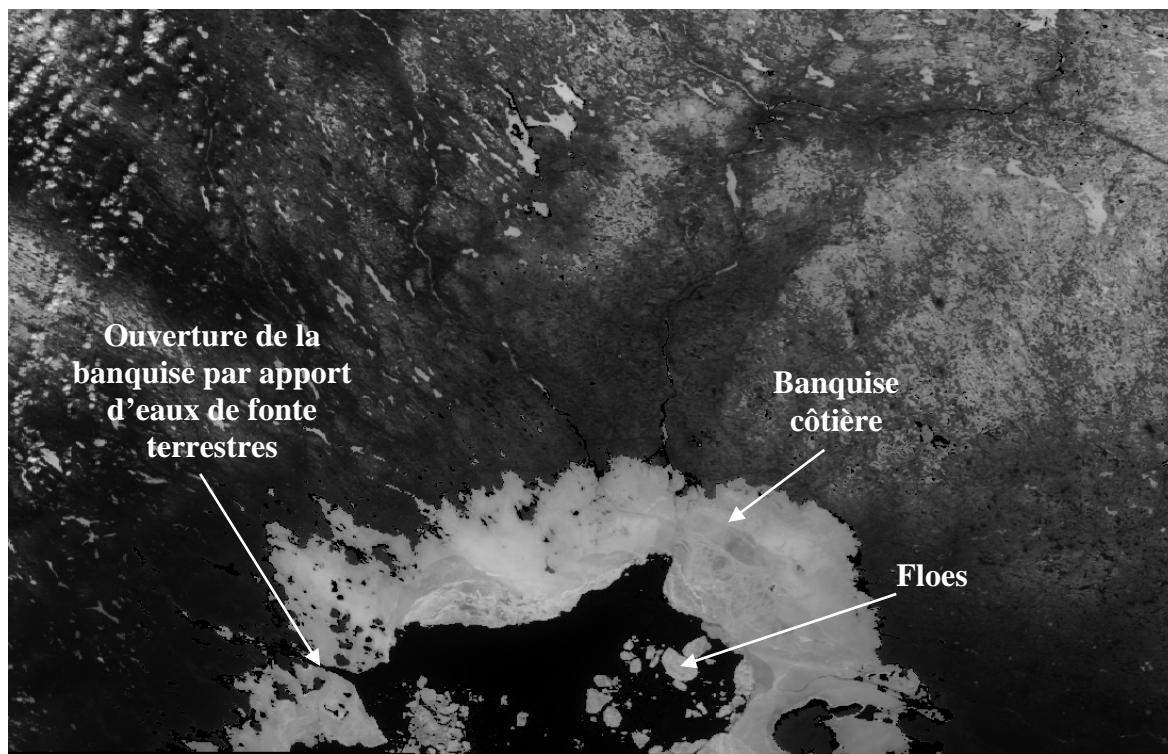


Image satellitaire 1 – La débâcle de la Baie de Botnie, le 4 mai 2003, image Envisat²²
Satellite image 1 – Ice breaking in the Bothnian Bay, May 4th 2003, Envisat image

Pour comprendre ces phénomènes, il est aussi fort intéressant de prendre en compte les observations vécues. En effet, un survol aérien nous a concrètement permis d'observer l'état de la banquise du Golfe de Riga durant sa fonte printanière en 2006.

Point témoignage 1 – Observation de l'état de la banquise et de sa fonte en hélicoptère

Un hélicoptère de l'Armée de l'Air de Lettonie atterrit sur la piste d'un ancien aéroport délabré, en service durant la période soviétique. Accompagnées d'un garde-côte, d'un caméraman et d'une photographe, ma collègue de l'Agence d'Hydrométéorologie de Lettonie et moi-même embarquons à bord pour un survol de deux heures du Golfe de Riga, le 29 mars 2006 (figure 8). La banquise a alors entamé sa débâcle (cf. image satellitaire 2 prise quatre jours avant le vol) et un

²² Les images Envisat ont été traitées par le Département de Géophysiques de l'Université d'Helsinki dans le cadre du programme "Snow and ice in North Europe (ENVISAT-AO 455)"

spectacle magnifique se présente alors à nous. Banquise côtière, polynies, floes, banquise consolidée, fissure, eau libre de glace... autant d'états physiques du couvert de glace dus à la taille du golfe et désormais évidente à identifier. Après le survol de la ville de Riga après le décollage, l'hélicoptère survole le rivage vers le Nord-Est. Une banquise côtière large de quelques centaines de mètres est fixée à la côte. L'embouchure de la Daugava et l'entrée du port de Riga sont totalement libres de glace du fait de leur très forte fréquentation par les navires. En se dirigeant vers le Nord en direction de Salacgrīva, l'eau libre de glace est parsemée d'îlots de glaces flottantes, puis plus au large le pack de glace est remarquable. En arrivant à la frontière esto-lettonne, on aperçoit le petit port de Salacgrīva totalement pris en glace. À quelques centaines de mètres de là, le couvert de glace se décompose en pancake. Puis l'hélicoptère prend la direction de Mersrags, vers l'Ouest – Sud-Ouest, et traverse le centre du golfe pris de glace dans son ensemble. Alors différentes formes et couleurs se présentent dans un spectacle magnifique et étonnant. La banquise est en pleine désagrégation et différents processus de déformation, d'ouverture dans les glaces et de fonte sont largement visibles. Les fractures sont effectivement nombreuses et de toutes sortes. En effet, une multitude de chenaux de séparation (photographie 6) de quelques mètres dus à la divergence des floes est remarquable et permet aux quelques navires aperçus de s'acheminer vers le Port de Riga. La banquise est craquelée et parsemée de fissures peu larges recouvertes de nouvelle glace (photographie 7). Au plus près du rivage, des polynies et des sarrasins (brash ice) (photographie 8) sont également perceptibles. À l'approche de Mersrags, l'hélicoptère s'oriente désormais vers la pointe de Kolka, direction Nord - Nord-Ouest. Il est possible d'apercevoir le phare de Kolka (photographie 9), situé à moins de cinq kilomètres de la côte, encerclé par les glaces. En passant le détroit d'Irbe, la banquise devient de plus en plus lâche jusqu'à disparaître en Baltique Propre. La désagrégation de la banquise est ainsi largement perceptible et de nombreux sarrasins "s'effilochent" vers la Baltique Propre poussés par le vent (photographie 10). En effet, la Baltique Propre n'a pas gelé. Seuls quelques pancakes ou floes y flottent isolément. Une fine bande littorale a pris en glace et a fondu rapidement (photographie 11). Elle s'élargit à l'approche de l'entrée du golfe. Au retour vers Riga, quelques petits ports de la côte Ouest du Golfe sont toujours pris par les glaces malgré la présence d'un chenal libre de glace permettant l'accès aux navires. Le survol du Golfe de Riga arrive à sa fin après deux heures d'observations d'un paysage époustouflant.

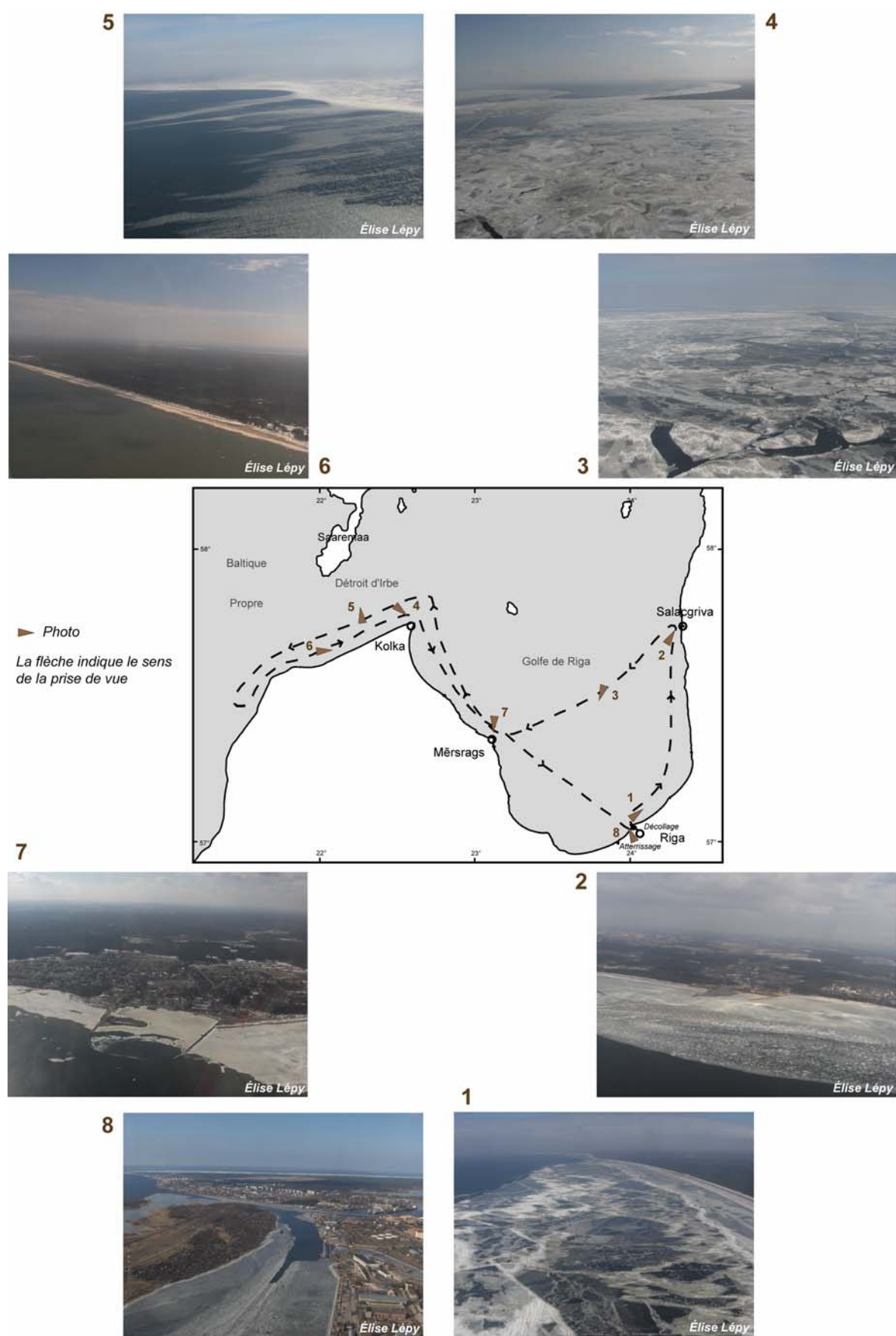


Figure 8 – Survol en hélicoptère du Golfe de Riga – 29 mars 2006
 Figure 8 – Helicopter flight above the Gulf of Riga – March 29th 2006

Réalisé par Élise Lépy



Image satellitaire 2 - Le Golfe de Riga, le 25 mars 2006, image MODIS Aqua
Quatre jours avant le survol en hélicoptère
*Satellite image 2 - The Gulf of Riga, March 25th 2006, Modis Aqua image
Four days before the flight in helicopter*

Chenal de
séparation



Photographie 6 -
Centre du Golfe
de Riga -
29 mars 2006

*Picture 6 -
Center of the
Gulf of Riga -
March 29th 2006*

Élise Lépy

Fissure
recouverte de
nouvelle glace

Mare



Photographie 7 -
Centre du Golfe
de Riga (2) -
29 mars 2006

*Picture 7 -
Center of the
Gulf of Riga (2) -
March 29th 2006*

Floe

Élise Lépy

"Brash"



Photographie 8 -
Côte Sud-Est
du Golfe
de Riga -
29 mars 2006

*Picture 8 -
South-East coast
of the
Gulf of Riga -
March 29th 2006*

Polynies

Élise Lépy

Photographie 9 -
Le phare de
Kolka -
29 mars 2006

*Picture 9 -
Kolka
lighthouse -
March 29th 2006*



Élise Lépy

Photographie 10 -
Désagrégation
de la banquise
du détroit d'Irbe
vers la Baltique
Propre -
29 mars 2006

*Picture 10 -
Disappearance
of sea ice in
Irbe Straits
close to the
Baltic Proper -
March 29th 2006*



Élise Lépy

Photographie 11 -
Les côtes lettones
de la Baltique
Propre -
29 mars 2006

*Picture 11-
Latvian coasts
from Balic Proper -
March 29th 2006*



Élise Lépy

4.2 – LES CARACTERISTIQUES GLACIO-MARINES DES EAUX DES GOLFES DE BOTNIE ET DE RIGA ET LEUR VARIABILITE SPATIO-TEMPORELLE

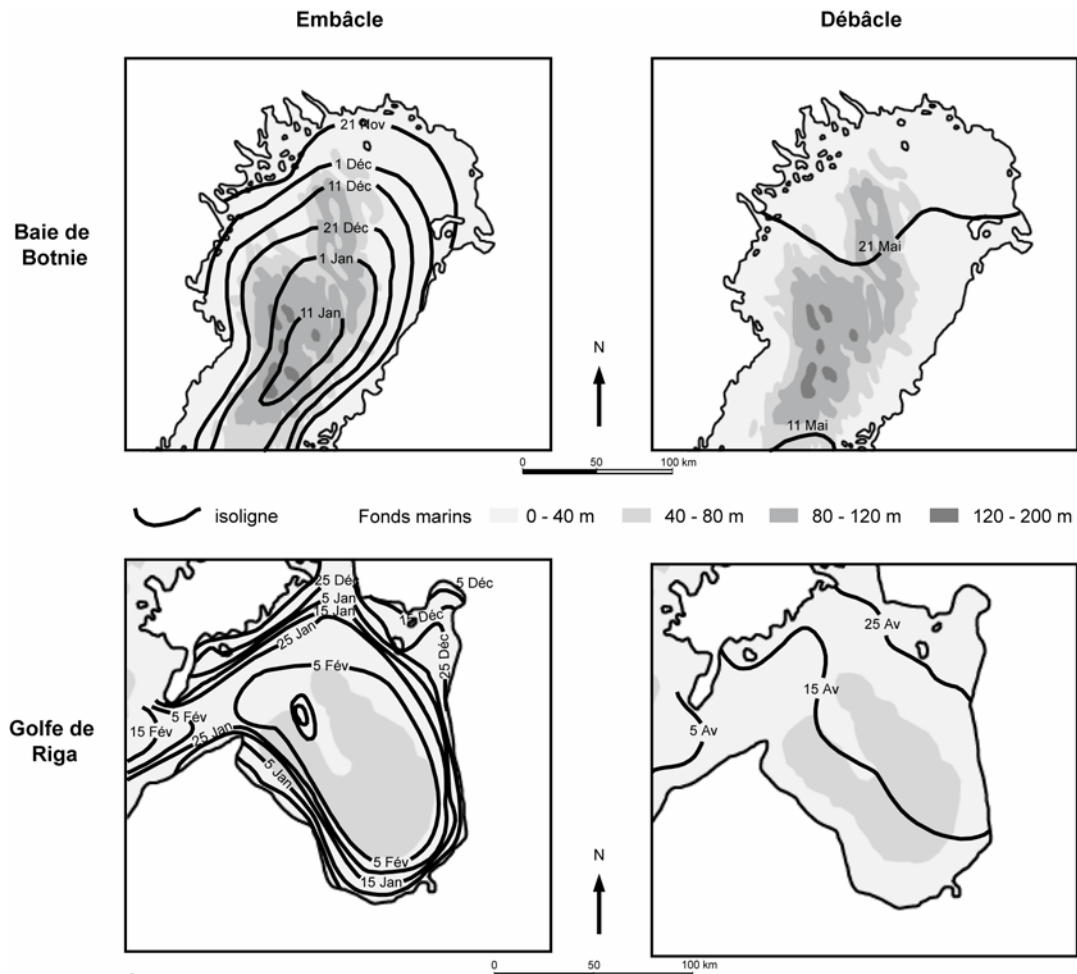
L'importance et l'ampleur des phénomènes glacio-marins s'évaluent et se mesurent à travers différentes caractéristiques : les dates d'embâcle et de débâcle soit la durée du cycle glaciaire et l'épaisseur du couvert de glace. Il s'agit ici d'analyser le régime des glaces marines.

4.2.1 – Les dates moyennes de prise en glace et de fonte dans les Golfes de Botnie et de Riga

L'embâcle de la Baie de Botnie et du Golfe de Riga se fait des côtes vers le centre à la fin de l'automne pour la première et au début de l'hiver pour le second. La débâcle, en revanche est, de manière générale, orientée Sud-Nord pour la Baie de Botnie et Ouest-Est pour le Golfe de Riga. Les cartes suivantes (cartes 19) ne sont que l'illustration générale des dates de prise en glace et de fonte.

En effet, les dates retenues aux stations côtières donnent un meilleur aperçu de l'apparition et de la disparition des glaces flottantes. On distingue ainsi le début de l'embâcle, c'est-à-dire le moment où les premières glaces flottantes se forment, de la formation du couvert de glace permanent. Il en est de même pour le début de la fonte de la banquise et de la disparition totale des dernières glaces flottantes lors du déglacement printanier. Ainsi à l'extrémité Nord du Golfe de Botnie, les premières glaces apparaissent en moyenne vers le 6 Novembre (pour Kemi et Oulu) alors qu'elles se font plus tardives pour les eaux plus méridionales : 26 novembre à Kokkola, 6 décembre à Vaasa et 22 décembre à Helsinki dans le Golfe de Finlande (tableau 7). Le couvert de glace permanent apparaît entre sept et neuf jours après les premières glaces flottantes dans le Golfe de Botnie. Au printemps, les dernières glaces flottantes disparaissent en avril en Mer de Botnie – 24 avril à Vaasa, 6 avril à Turku – puis plus tardivement en Baie de Botnie – 17 mai à Kemi, 7 mai à Oulu. De ce fait le cycle glaciaire est relativement long dans le Nord de la Mer Baltique.

Le Golfe de Riga, quant à lui, ne prend pas tous les hivers en glace. Alors il peut être difficile d'établir des moyennes de dates d'embâcle et de fonte. Cependant des études ont été menées par des chercheurs russes, (Terziev *et al.* in Mikelsone, 2003), qui ont établi en 1992 les dates moyennes de prise en glace et de fonte dans le Golfe de Riga, à l'époque soviétique.



Sources :
 Baie de Botnie : Swedish Meteorological and Hydrological Institute
 Golfe de Riga : Государственный комитет СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды

Réalisé par Élise Lépy

Cartes 19 – Dates moyennes de prise en glace et de débâcle en Baie de Botnie (1963-1979) et dans le Golfe de Riga (pendant l'époque soviétique)
 Maps 19 – Average ice freezing and melting dates in the Bay of Bothnia (1963-1979) and in the Gulf of Riga (during the Soviet time)

Stations	Baie de Botnie		Stations	Golfe de Riga	
	Gel	Fonte		Gel	Fonte
Kemi	6 nov.	17 mai	Salacgriva	24 déc.	12 avril
Oulu	8 nov.	7 mai	Skulte	26 déc.	7 avril
Raahe	20 nov.	9 mai	Jurmala	4 janv.	29 mars
Kokkola	24 nov.	6 mai	Kolka	1 janv.	9 avril
Kalix	21 nov.	18 mai	Sorve	4 déc.	6 avril
Luleå	16 nov.	15 mai	Ruhnu	8 déc.	23 avril
Skellefteå	14 déc.	5 mai	Kihnu	10 déc.	27 avril
Umeå	11 déc.	23 avril	Pärnu	24 nov.	25 avril

Élise Lépy

Les données correspondent aux périodes suivantes : 1937 - 2005 pour les stations finlandaises, 1930 - 1990 pour les stations suédoises, 1903 - 1990 pour les stations estoniennes (exceptée Pärnu: 1921 - 1990). Pour les stations lettones, les données correspondent aux moyennes de 78 années pour Salacgriva, 63 années pour Skulte, 52 années pour Riga et 79 années pour Kolka.

Sources : Finnish Institute of Marine Research ; Swedish Meteorological and Hydrological Institute ; Jevrejeva et Leppäranta, 2002 ; Maritime Administration of Latvia

Tableau 7 – Dates moyennes d'embâcle et de débâcle dans la Baie de Botnie et le Golfe de Riga
 Table 7 – Average ice freezing and melting dates in the Bay of Bothnia and the Gulf of Riga

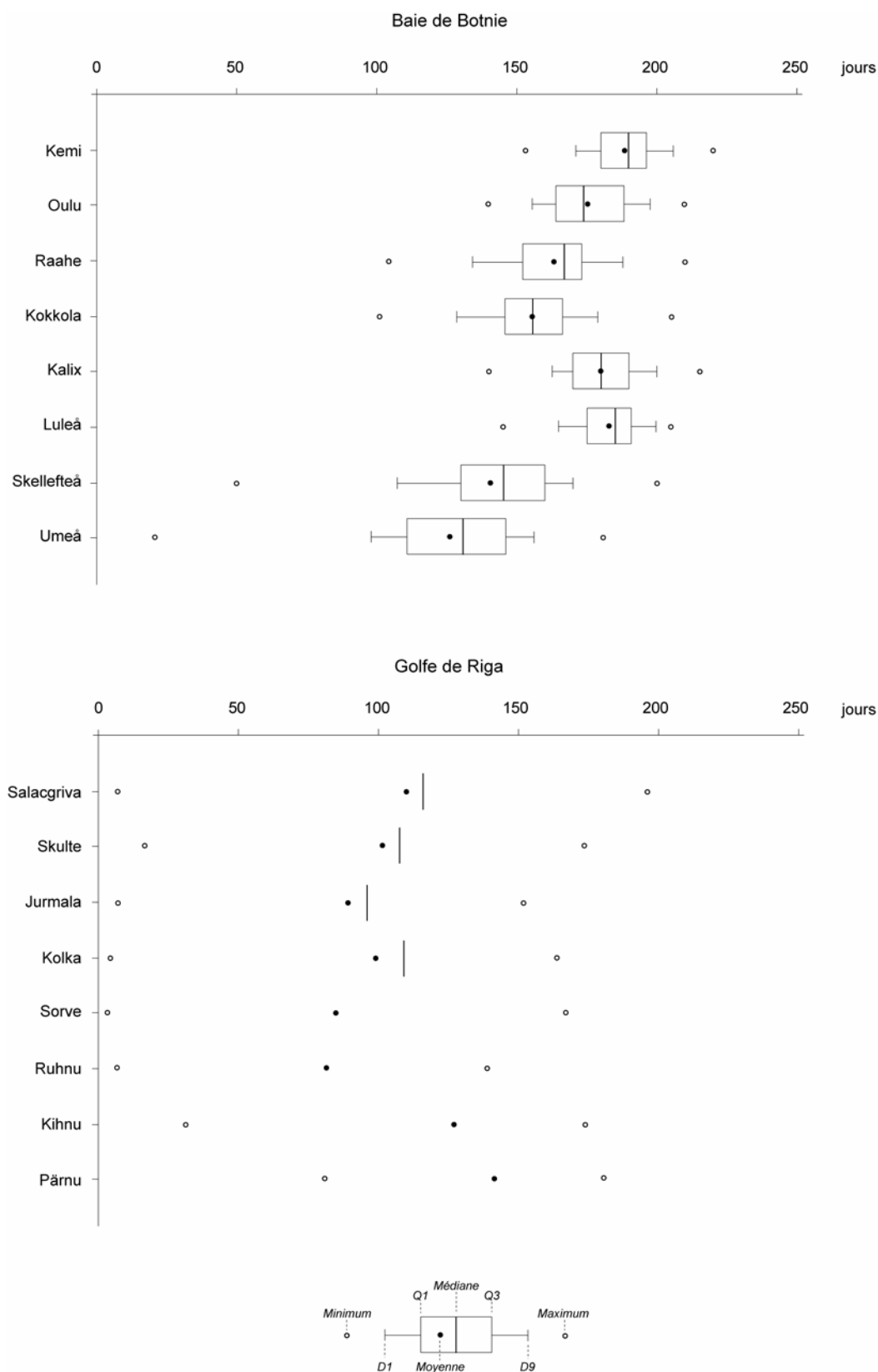
4.2.2 – Le cycle glaciai

Le cycle glaciai est « *la période annuelle s'étendant du début de l'englacement automnal jusqu'à la fin du déglacement* » (Hamelin, 1994, 56) comptée en nombre de jours. Cette période est variable dans le temps et dans l'espace d'une saison à l'autre.

Le diagramme de boîtes à moustaches (graphique 3) présente le nombre de jours de gel de l'eau de mer pour huit stations de la Baie de Botnie à travers une analyse statistique. Ces boîtes indiquent la médiane, les quartiles et les valeurs extrêmes de la variable. Elles permettent d'apprécier alors l'étendue du phénomène glaciai ainsi que sa variabilité et de discerner les ressemblances entre les stations. Le second document concerne les stations lettonnes et estoniennes du Golfe de Riga. Il montre moins d'informations, mais les valeurs extrêmes et la moyenne pour chaque station donnent toutefois la possibilité de comparer ces stations entre elles et avec celles de la Baie de Botnie. De manière générale, le nombre de jours avec glace est plus important en Baie de Botnie que dans le Golfe de Riga. Toutefois, on remarque que le cycle glaciai est beaucoup plus variable dans le Golfe de Riga : en effet, l'amplitude entre le maximum de jours enregistrés et le minimum y est beaucoup plus conséquent. Ceci témoigne d'une variabilité interannuelle très importante – de quelques jours à presque 200 jours (Salacgriva).

On note également que les stations les plus septentrionales de la Baie de Botnie sont celles dont le cycle glaciai varie le moins alors que, plus au Sud, le nombre de jours varie davantage notamment sur la côte suédoise. En effet, à des latitudes similaires, on remarque que d'une part Raahe détient un nombre moyen de jours avec glace plus élevé que Skellefteå - respectivement 163 et 140 jours – et que d'autre part, la station suédoise connaît une variabilité temporelle plus marquée. Il en est de même aux latitudes de Kokkola et de Umeå. Ainsi, au niveau du Quark, une dissymétrie de façade s'opère entre les côtes suédoises et finlandaises.

Le Golfe de Riga présente des informations statistiques différentes. Il est d'abord important de préciser que les données ne concernent que les années où de la glace s'est formée. Sinon le minimum de jours de gel de l'eau de mer serait nul puisque pendant certains hivers la prise en glace n'a pas lieu. Toutefois, on observe une variabilité temporelle du nombre de jours avec glace avec des amplitudes de plus de 150 jours pour la plupart des stations du Golfe de Riga. En moyenne, la côte Est prend en glace plus longtemps que la côte Ouest, probablement sous effet des vents d'Ouest qui pousse le pack de glace vers la côte Est. Le profil de la station de Pärnu, sur la côte estonienne, tend à être très similaire à celui de certaines stations côtières de la Baie de Botnie.



Sources :
 Finnish Institute of Marine Research, 1937-2005
 Swedish Meteorological and Hydrological Institute, 1930-1990
 Maritime Administration of Latvia, nombre d'années avec glace:
 Salacgriva, 78; Skulte, 63; Jurmala, 52; Kolka, 79
 Jevrejeva Sevtlana (2000), 1903-1990 sauf Pärnu 1921-1990

Réalisé par Élise Lépy

Graphique 3 – Le cycle glaciai en Baie de Botnie et dans le Golfe de Riga
 Graph 3 – Ice cycle in the Bay of Bothnia and the Gulf of Riga

Les eaux septentrionales de la Baie de Botnie prennent en glace pour une durée moyenne de 180 jours, cette durée diminuant vers le Sud. Le Golfe de Riga, quand il gèle, est figé en moyenne pour 100 jours.

De manière générale, certains auteurs ont observé une légère diminution de la durée de la saison glacielle des glaces (Seinä, 1993, 89 ; Vihma et Haapala, 2003, 35) qu'il faut toutefois nuancer en fonction du lieu. En effet, les variabilités spatio-temporelles du cycle glaciaire ayant des caractères différents entre la Baie de Botnie et le Golfe de Riga, les variations en sont alors influencées. On reviendra en détail sur ces questions dans notre dernière partie.

4.2.3 – L'épaisseur de glace en Baie de Botnie et dans le Golfe de Riga

4.2.3.1 – L'épaisseur maximale de la banquise

Tous les hivers, l'épaisseur maximale de glace est atteinte à la fin du mois de mars voire au début du mois d'avril pour la Baie de Botnie et à la fin du mois de février pour le Golfe de Riga. Bien entendu, de nombreuses fluctuations sont possibles d'autant plus que les stations de mesure se localisent plus au Sud et sont plus éloignées des côtes là où l'action des agents météomarine devient plus présente. Ainsi, il n'est pas rare qu'à la station de Raahe (Sud de la Baie de Botnie), l'épaisseur maximale de glace soit enregistrée durant le mois de février.

Bien évidemment, d'une saison à l'autre, l'épaisseur maximale de glace mesurée à une station fluctue. À titre d'ordre de grandeur, sur les trente dernières années, la Baie de Botnie a enregistré des épaisseurs maximales du couvert de glace variant de 30 cm en 1992 et 1995 à Rahja (proche du seuil du Quark), à 121 cm en 1985 à Ryöttä (au Nord de la Baie de Botnie). De son côté, la banquise du Golfe de Riga, quand elle est formée, peut atteindre 70 cm voire 80 cm d'épaisseur dans la Baie de Pärnu.

L'épaississement de la banquise se fait plus considérable à l'approche des côtes et vers le Nord. Prenons l'exemple d'un hiver où la prise en glace de la Mer Baltique a été « moyenne », l'hiver 2002/2003 où 232 000 km² d'eau marine ont gelé. Le tableau 8 précise alors l'épaisseur maximale de la banquise atteinte à différentes stations côtières de la Baie de Botnie et du Golfe de Riga.

Baie de Botnie				Golfe de Riga	
Skellefteå ¹	50	Virpiniemi ²	83	Pärnu ¹	70
Luleå ¹	70	Marjaniemi ²	85	Skulte ³	47
Kalix ¹	80	Raahel ²	55	Jurmala ³	22
Ryöytä ²	87	Rahja ²	88	Mersrags ³	45
Ajos ²	80				

Sources :

1 - cartes des conditions de glace du FIMR

2 - Seinä et al., 2006

3 - Latvian Environment, Geology and Meteorology Agency

Élise Lépy

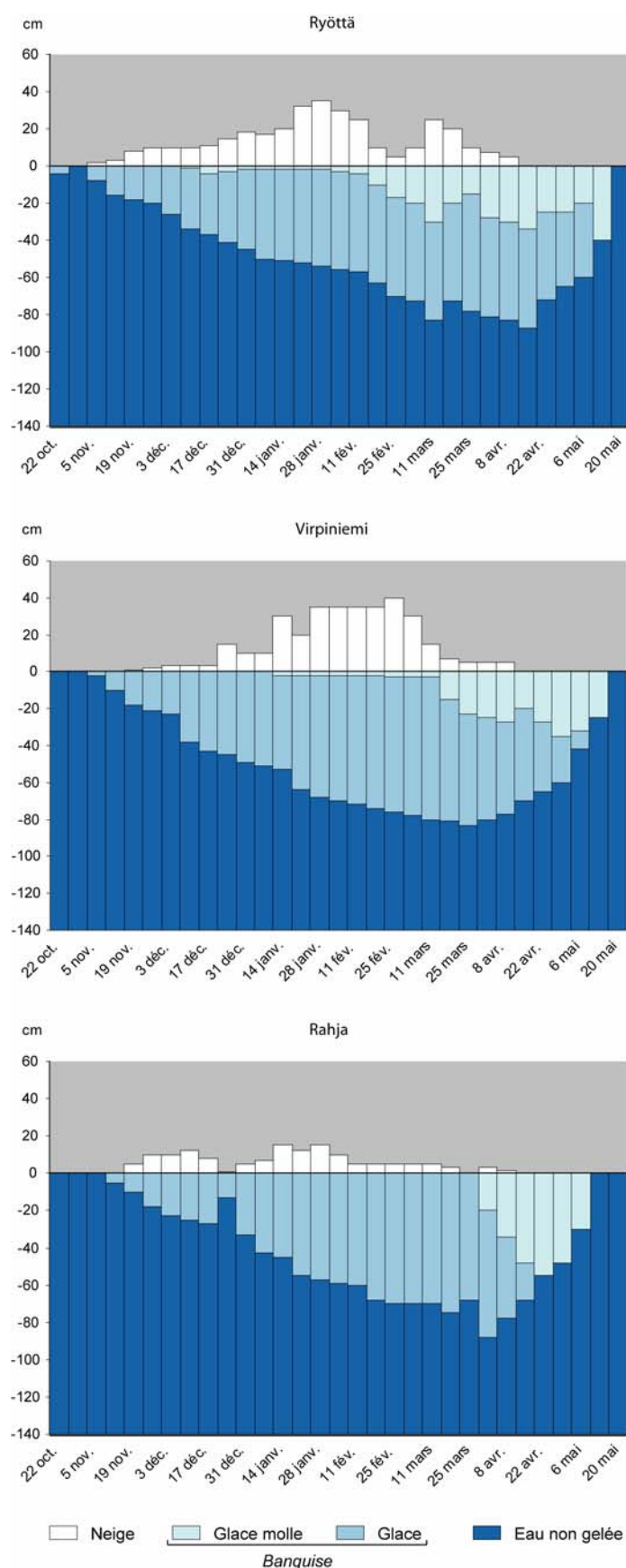
Tableau 8 – Épaisseurs maximales de glace en Baie de Botnie et dans le Golfe de Riga pendant l'hiver 2002/2003

Table 8 – Maximum icethickness in the Bay of Bothnia and the Gulf of Riga in 2002/2003

Il est aisé de constater que de manière générale, la banquise du Golfe de Riga est moins épaisse que celle de la Baie de Botnie, et qu'effectivement les stations les plus nordiques de chaque golfe enregistrent une épaisseur de glace plus importante.

4.2.3.2 – L'évolution de l'épaisseur de la banquise

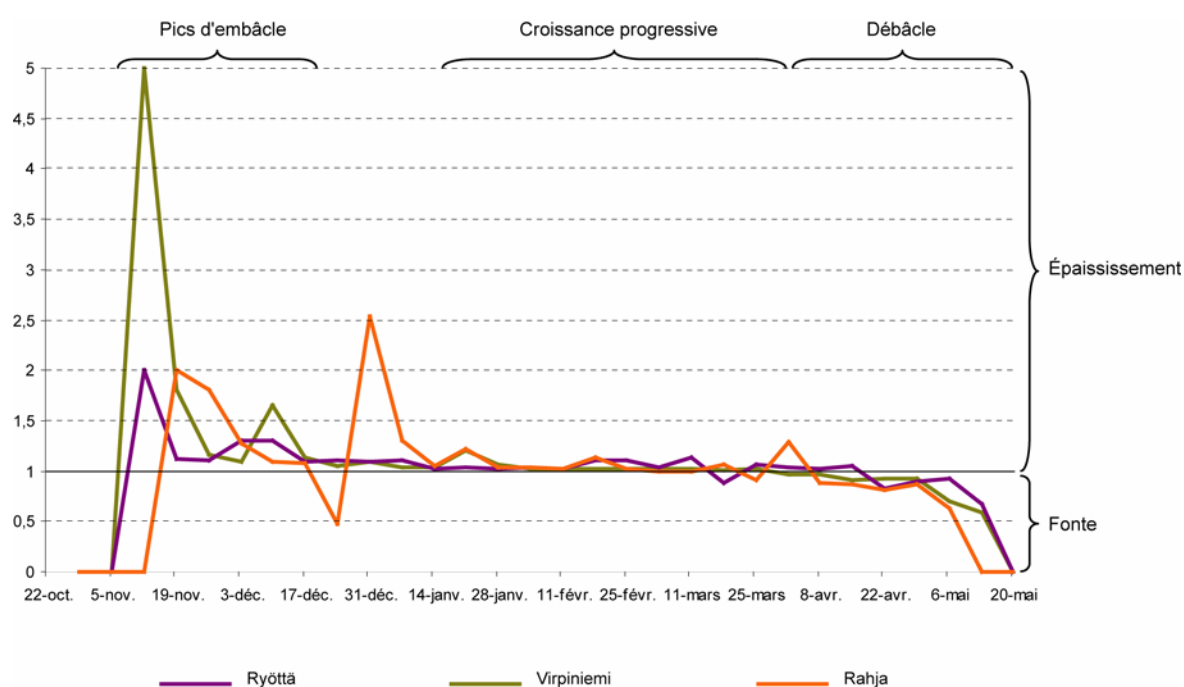
Comme on l'a déjà évoqué précédemment, l'épaisseur maximale de la banquise est atteinte après que la couverture de glace ait connu différents stades de croissance. Le cas de la Baie de Botnie permet de mieux comprendre l'évolution de l'épaississement de la banquise. Ryöytä, Virpiniemi et Rahja y sont trois stations côtières localisées à différentes latitudes où s'observent de façon chronologique la croissance de la banquise ainsi que la profondeur de neige présente sur le couvert de glace marine pendant l'hiver 2002/2003 (graphique 4).



Réalisé par Élise Lépy
d'après les données du Finnish Institute of Marine Research

Graphiques 4 – Évolution et composition de la banquise à Ryöttä, Virpiniemi et Rahja
Graphs 4 – Evolution and composition of ice pack at Ryöttä, Virpiniemi and Rahja

Globalement, le régime des glaces aux trois stations se présente de façon similaire avec une période de croissance de la banquise beaucoup plus longue que la période de fonte. Ainsi à l'automne 2002, l'embâcle des eaux marines et côtières de Ryöttä a été légèrement plus précoce que celle des eaux bordant Virpiniemi et Rahja. De même, la fonte rapide de la banquise a eu lieu plus tardivement à Virpiniemi et à Ryöttä. Mais il semble intéressant de souligner la vitesse à laquelle la couche de glace s'est épaissie (graphique 5).



Réalisé par Élise Lépy

Graphique 5 – Coefficients de croissance de la banquise à Ryöttä, Virpiniemi et Rahja pendant l'hiver 2002/2003

Graph 5 – Growth rate of ice pack at Ryöttä, Virpiniemi and Rahja

Il est ainsi remarquable que trois pics automnaux soulignent une période d'embâcle bien marquée, notamment à Virpiniemi où le coefficient de croissance atteint 5. À cette période de formation initiale du couvert de glace permanent, se succèdent des épisodes de croissance plus irréguliers. Au cœur de l'hiver, l'épaississement de la banquise se fait progressivement - coefficients proches de 1 - pour atteindre son maximum à la fin mars (83 cm à Virpiniemi) voire en avril (87 cm à Ryöttä, et 88 cm à Rahja). Au début du mois d'avril les glaces de Virpiniemi entament de façon régulière leur fonte - coefficients en deçà de 0 - et à la mi-avril pour celles de Ryöttä. En revanche, le couvert de glace présent à Rahja connaît quelques irrégularités dans son évolution puisque deux épisodes de fonte - l'un fin décembre, l'autre fin mars - ont eu lieu, suivis

d'épisodes de croissance. De plus, cette station enregistre une épaisseur maximale de glace très légèrement supérieure à celle des deux autres stations alors qu'elle est la station côtière la plus méridionale des trois. Ce constat ainsi que l'irrégularité de l'épaississement et de la fonte de la banquise s'expliquent ici par l'introduction et l'action de plusieurs facteurs d'ordre météorologique et météomarin dans le système cryomarin, toutes questions traitées dans le chapitre suivant.

Au-delà des différents états des eaux marines en période hivernale, les graphiques 4 font part de la composition de la banquise. Effectivement, l'eau une fois prise en glace connaît différents états de résistance. Ainsi, la banquise est composée de deux couches de glace : l'une qui se forme dès l'apparition des premiers cristaux de glace, glace dure qualifiée de « *steel ice* » en langue anglaise ; et l'autre plus tard, quand des épisodes de redoux de l'air se font sentir, est une couche de glace molle appelée « *wet ice* » en anglais. Lors de la période de fonte, cette dernière couche constitue la partie supérieure et molle de la banquise. Sa présence est souvent un signe du début de la décomposition de la banquise.

4.2.4 – La variabilité spatio-temporelle des conditions glacielles

Les conditions glacio-marines de la Mer Baltique ne sont pas similaires sur l'ensemble du bassin. La variabilité spatiale de la prise en glace y est très marquée à cause des différents facteurs naturels de forçage qui contrôlent la formation de la banquise. Ainsi, une variabilité plus nette et donc plus forte est à noter dans le Sud de la Mer Baltique. La Baie de Botnie et le Golfe de Riga ne présentent ainsi pas les mêmes probabilités d'occurrence du gel de leurs eaux marines : elle est de 100 % sur les côtes suédoises et finlandaises de la Baie de Botnie, et de 73 % à Ruhnu, de 83 % à Kihnu et de 84 % à Pärnu (Jevrejeva et Leppäranta, 2002, 253). Cela signifie que le Golfe de Riga ne prend pas en glace tous les hivers contrairement au Golfe de Botnie. Ainsi, les contraintes naturelles marines et littorales liées à l'englacement et les impacts sur les populations riveraines diffèrent. Le fait que l'occurrence de ce phénomène cryomarin soit d'une part maximale de façon saisonnière, et d'autre part qu'elle soit variable, entraîne des modifications non négligeables dans l'interprétation du comportement des sociétés (économie, culture...) face à l'englacement, comme on l'observera plus loin.

L'analyse de la matrice de corrélation ci-dessous (tableau 9) qui porte sur la durée du cycle glacial entre 1960/61 et 1989/90 permet d'établir deux types de comparaison. Il s'agit dans un premier temps d'étudier la ressemblance des stations côtières de la façade Ouest entre elles puis celle de la façade Est de la Baie de Botnie. Alors que les stations finlandaises présentent des coefficients relativement bons puisqu'ils sont

supérieurs à 0,55, les stations suédoises sont marquées par une scission nette entre le Nord de la Baie de Botnie et le Sud c'est-à-dire entre Luleå et Skellefteå où les coefficients sont très proches de zéro. L'opposition Nord-Sud de la côte Est est beaucoup moins marquée. Les coefficients sont décroissants en se dirigeant vers le Nord. En revanche cette opposition est davantage marquée du côté suédois. Par ailleurs, une seconde comparaison oppose les stations côtières de même latitude. Une dissymétrie de façade est remarquable. Ainsi, la station d'Umeå ressemble davantage à la station de Raahe qui est située bien plus au Nord alors que celle de Skellefteå a des caractéristiques glacielles proches de celle de Kokkola située plus au Sud. Quant aux stations septentrionales de la Baie de Botnie, même si les coefficients ne sont pas extrêmement élevés, elles restent toutefois assez similaires ($> 0,6$).

	Kemi	Oulu	Raahe	Kokkola	Kalix	Luleå	Skellefteå	Umeå
Kemi	1							
Oulu	0,754	1						
Raahe	0,612	0,618	1					
Kokkola	0,555	0,614	0,896	1				
Kalix	0,599	0,536	0,386	0,267	1			
Luleå	0,641	0,578	0,447	0,35	0,882	1		
Skellefteå	0,374	0,419	0,522	0,617	0,04	0,062	1	
Umeå	0,217	0,14	0,572	0,537	-0,046	-0,081	0,725	1

Tableau 9 – Matrice de corrélation sur la durée du cycle glacial
Table 9 – Correlation matrix of the length of the ice season

4.2.5 – Conclusion partielle

En définition, la variabilité spatio-temporelle des processus glaciels semble plus marquée dans les espaces marins méridionaux. La probabilité d'occurrence de la formation de la banquise témoigne évidemment de ces disparités spatiales et temporelles. Les eaux de la Baie de Botnie prennent en glace tous les hivers contrairement à celles du Golfe de Riga dont le taux d'englacement varie plus sensiblement. La Baltique méridionale est de manière générale plus sensible aux changements de températures du fait de sa position latitudinale.

De manière générale, cette variabilité est davantage visible au début de la saison glacielle pendant l'embâcle des eaux marines. Un autre élément qui contribue de manière locale à cette variabilité est l'apport des eaux terrestres en Mer Baltique. N'oublions pas que la Mer Baltique est le bassin de réception de nombreux cours d'eau et que son bassin hydrologique continental est important. Par conséquent, les eaux déversées dans la Baie

de Botnie et dans le Golfe de Riga, ainsi que leur régime hydrologique, est à prendre en considération.

4.3 – LES APPORTS DES EAUX CONTINENTALES

L'hydrologie de la Mer Baltique est largement influencée par les apports en eaux fluviales et lacustres (Granskog et *al.*, 2006, 146). Comme nous l'avons déjà évoqué en première partie, le bassin hydrographique de la Mer Baltique s'illustre par l'abondance des cours d'eau et des lacs en Fennoscandie, résultat de la disparition du grand glacier pléistocène, et par des grands fleuves « continentaux » aux débits importants dans sa partie méridionale. Si l'on considère les seuls lacs de la Fennoscandie, ils recouvrent 8% des terres comptant plus de 400 000 lacs dont la superficie est supérieure à un hectare (Hyvärinen et Kajander, 2005, 142). Tous les hivers, la majorité des eaux fluviales et lacustres de ce large bassin, exceptées les plus méridionales, connaissent un changement de leur état : en effet, dans le Nord de la Fennoscandie, il n'est pas rare que la glace fige de petits cours d'eau pour une période de 6 à 7 mois (*ibid.*, 141). Ainsi, le régime des eaux continentales se trouve modifié par le gel des cours d'eau et des lacs. Les variations importantes de débits dans l'année ont alors un impact considérable sur la prise en glace et la fonte des eaux marines estuariennes et littorales de la Mer Baltique et plus particulièrement de la Baie de Botnie qui prend en glace tous les hivers. Il s'agit ici d'analyser les différents régimes hydrographiques des cours d'eau et des lacs du bassin-versant de la Baie de Botnie et d'étudier l'impact de leur prise en glace sur les processus cryomarins des littoraux proches.

4.3.1 – Le bassin hydrographique de la Baie de Botnie

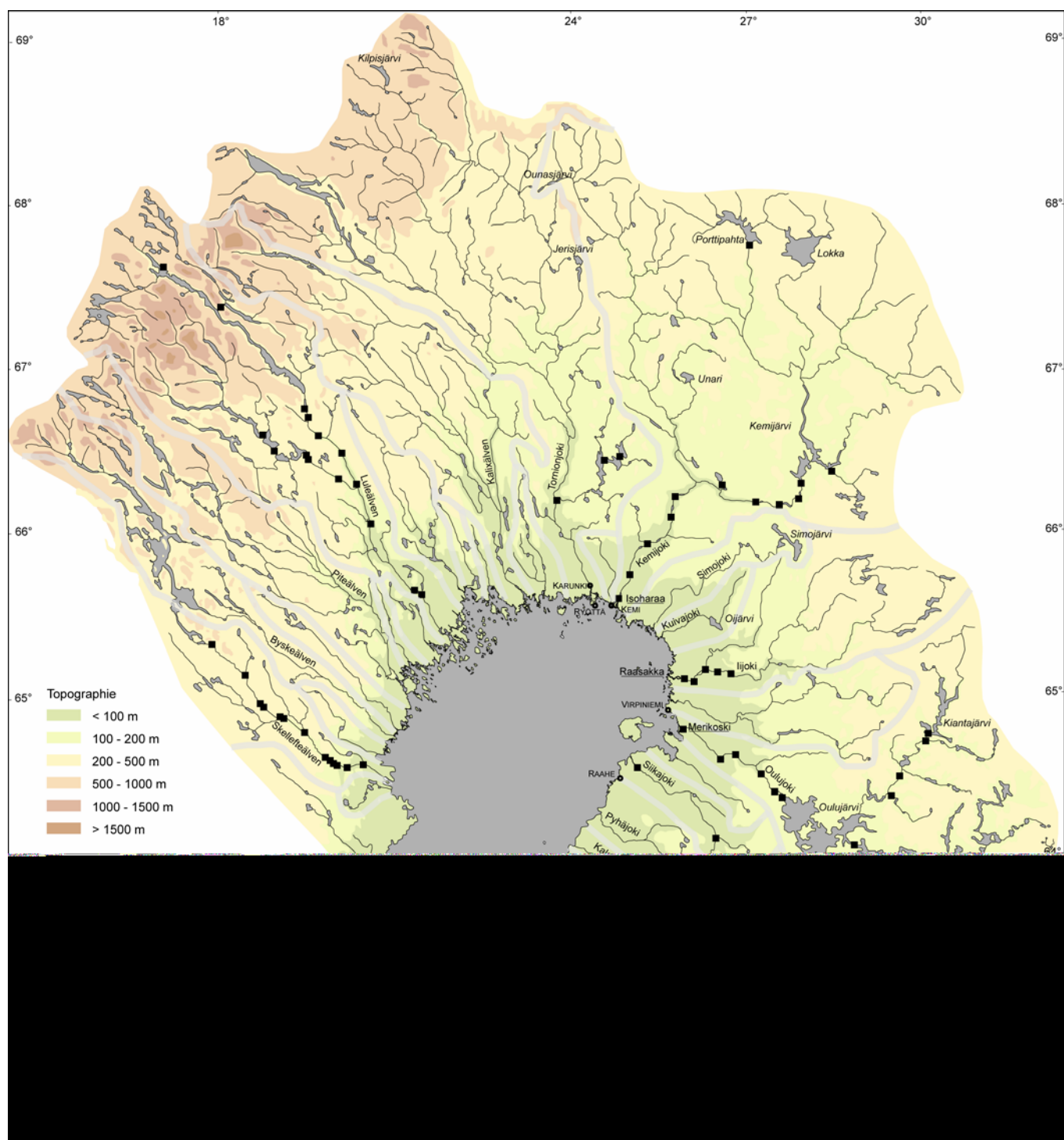
Les ruisseaux, rivières et fleuves qui déversent leurs eaux dans la Baie de Botnie drainent différents domaines géomorphologiques du bassin-versant : les reliefs de montagnes des Alpes scandinaves à l'Ouest, les terres intérieures de Finlande au modelé vallonné, et les plaines littorales (carte 20). Ainsi, Carl Erik Johansson (2005, 325) distingue les cours d'eau en fonction de la géomorphologie et des conditions hydrographiques des domaines qu'ils parcourent. Deux catégories de cours d'eau se différencient alors dans le bassin-versant de la Baie de Botnie : l'une regroupe les cours d'eau qui prennent leur source en domaine montagneux, et l'autre ceux des terres intérieures de Finlande. La première catégorie intéresse particulièrement les rivières suédoises et celles du Nord de la Finlande. Leurs cours supérieurs traversent les vallées de montagne de la chaîne des Scandes avant de parcourir les plaines vallonnées du Norrbotten et de Laponie puis s'écoulent rapidement dans la mer. En revanche, les plus importantes rivières de la

Laponie finlandaise prennent source dans les domaines orientaux de petites montagnes puis parcourent les reliefs vallonnés des terres finlandaises et enfin les larges plaines sédimentaires littorales de la côte Est.

Il est ainsi possible de distinguer deux types de régimes hydrographiques dans le bassin versant de la Baie de Botnie : le régime montagnard et le régime des terres intérieures (Hyvärinen et Kajander, 2005, 149). Le régime montagnard caractérise les cours d'eau suédois et nord-finlandais pour lesquels le régime nival est dominant. Les écoulements les plus importants ont ainsi lieu entre les mois de mai et de juillet pendant lesquels la débâcle fluviale écoule près de la moitié de leurs eaux (Giret, 2007, 84) alors que les plus bas débits sont enregistrés entre février et mars. Ces rivières enregistrent toutefois deux pics de crue : le premier causé par la fonte des glaces fluviales et lacustres en aval, et le second dû à la fonte nivale en montagne en été. La plupart de ces rivières traversent des systèmes lacustres « *qui donnent à leurs régimes une allure faussement glaciaire, par la fonte de la réserve glacielle des nappes d'eau* » (*ibid.*, 85). La plus septentrionale de ces rivières de montagne (*fjeld rivers*) est la Tornionjoki, frontière naturelle entre la Suède et la Finlande. À l'Est, les eaux des terres intérieures finlandaises dominées par les régions forestières et côtières, dépendent pour leur part d'un régime nivo-pluvial. Ces rivières connaissent un pic de crue au printemps causé par la fonte des glaces fluviales et lacustres et de la neige, et également en octobre et novembre dû aux précipitations automnales.

Le bassin hydrologique de la Baie de Botnie compte ainsi de nombreux sous-bassins d'étendue différente dont les plus importants sont celui de la Kemijoki, de la Tornionjoki, de la Luleälven, de la Kalixälven et de l'Oulujoki²³ (tableau 10). Bien entendu leurs cours d'eau principal est relativement long sans toutefois atteindre les dimensions de certains fleuves européens. D'autre part, ces sous-bassins sont dotés d'une multitude de lacs qui ont un rôle prépondérant dans l'hydrologie des fleuves. De loin le plus grand lac finlandais de la Baie de Botnie, le lac Oulujärvi s'étend sur plus de 880 km² suivi de loin par le lac artificiel Lokka situé au Nord du bassin de la Kemijoki (tableau 11).

²³ Une description de ces cours d'eau est faite en annexe 7.



Carte 20 – Le relief et l'hydrologie du bassin-versant de la Baie de Botnie
 Map 20 – Relief and hydrology of the Bay of Bothnia watershed

Cours d'eau	Superficie du bassin versant (km ²)	Part des lacs (%)	Longueur (km)
Ähtävänjoki	2000	10	80
Lestijoki *	1373	6,2	
Pyhäjoki *	3712	5,2	
Siikajoki	4283	2	120
Oulujoki	22841	11,5	290
Iijoki *	14191	5,7	
Kuivajoki*	1356	2,7	
Simojoki	3109	6	175
Kemijoki	51127	4,3	600
Tornionjoki	401 31	4,6	510
Kalixälven	23103	3	450
Råneälven	4270	4	210
Luleälven	25245	9	450
Piteälven	10816	9	400
Byskeälven	3620	7	200
Skellefteälven			440

Sources : Johansson, 2005
*Finnish Environment Institute

Tableau 10 – Les bassins versants de la Baie de Botnie
Table 10 – Watersheds of the Bay of Bothnia

Lacs	Superficie (km ²)	Lacs	Superficie (km ²)
Oulujärvi	887,09	Lentua	79,21
Lokka (artificiel)	315,40	Lestijärvi	64,52
Kemijärvi	230,91	Ala Suolijärvi	55,89
Kiantajärvi	191,15	Vuokkijärvi	55,25
Porttipahta (artificiel)	148,60	Miekojärvi	53,34
Lappajärvi	145,49	Lammasjärvi	46,82
Rehja -Nuasjärvi	96,44	Kostonjärvi	43,69
Simojärvi	89,93		

Source : Finnish Environment Institute

Tableau 11 – Les plus grands lacs finlandais du bassin hydrographique de la Baie de Botnie
Table 11 – The biggest lakes in Finland in the Bay of Bothnia watershed

4.3.2 – L'exploitation des ressources hydrologiques

En Fennoscandie, rares sont les cours d'eau et lacs dépourvus d'ouvrages hydroélectriques et d'autres constructions, ce qui modifie de façon sensible les conditions « naturelles » de l'écoulement fluvial (carte 20). En effet, depuis les années 1950, de nombreux bassins versants ont été dotés de barrages ou de centrales hydroélectriques dans le but de contrôler les débits d'eau mais surtout de produire de l'énergie électrique. Les rivières sont alors gérées par des séries d'ouvrages le long de leur cours telles les rivières Oulujoki et Kemijoki en Finlande et Umeälven en Suède. En revanche la Tornionjoki est l'un des rares grands cours d'eau à être libre de toute construction. Malgré l'abondance de lacs naturels en Finlande, la Laponie compte deux grands lacs artificiels, le Lokka et le Porttipahta situés au Nord du bassin versant de la Kemijoki. D'autres lacs ont été construits durant la seconde moitié du XX^{ème} siècle, souvent par établissement d'un barrage dans des dépressions telles que les vallées (Hyvärinen et Kajander, 2005, 143). Ces lacs artificiels forment de véritables réservoirs d'eau.

À titre d'exemple, en 1985, sur les 1250 MW d'énergie hydroélectrique produits par les stations de la rivière Kemijoki, 870 MW ont été exploités, et 560 sur 580 sur celle de Oulujoki (Johansson, 2005, 339). Bien entendu, l'exploitation de ces ressources hydrologiques a un réel impact sur le régime des cours d'eau. En effet, les rivières naturelles ont un rapport plus élevé entre les périodes de crue et d'étiage alors que les débits des rivières exploitées sont contrôlés et régulés de manière à ce que les périodes de crue présentent des débits plus bas et les périodes d'étiage des débits plus élevés. En annexe 8, sont données d'autres précisions sur les stations hydroélectriques finlandaises.

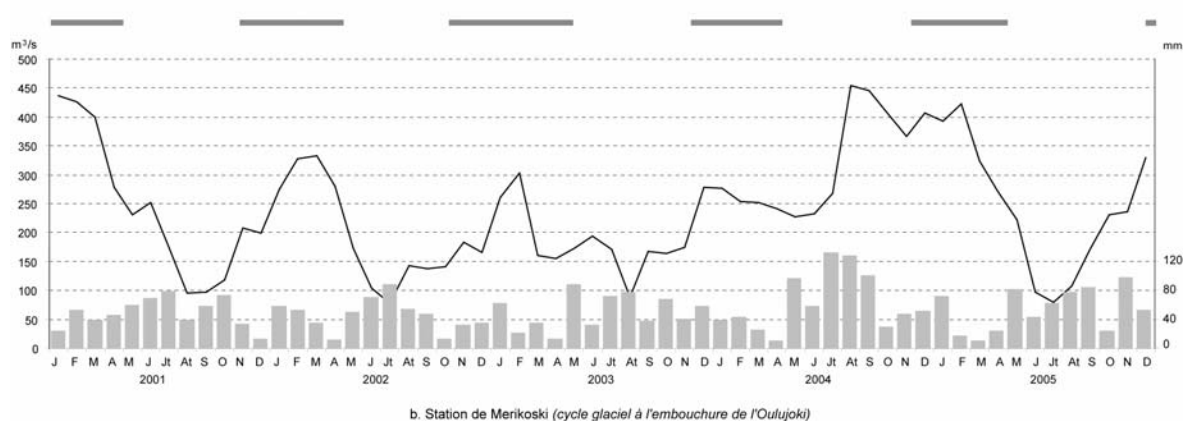
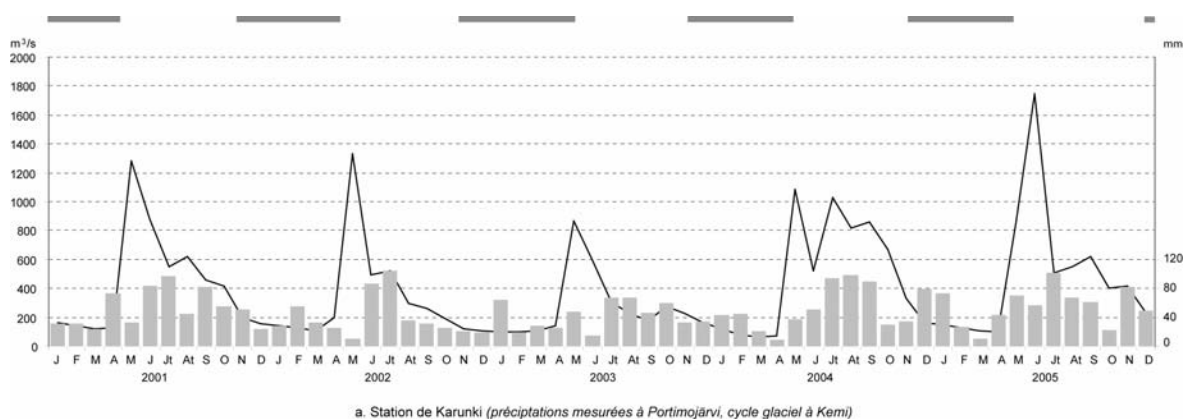
4.3.3 – Les régimes hydrologiques

L'exploitation des ressources en eau continentale a des répercussions inévitables sur les régimes hydrologiques des rivières. Le tableau 12 ci-dessous présente les principaux cours d'eau finlandais et suédois qui se déversent dans la Baie de Botnie. Il est précisé dans le document si le cours d'eau est exploité ou non. On peut remarquer l'importance, en terme d'hydrologie, de quatre cours d'eau dont le module annuel est supérieur à 250 m³/s près de leur embouchure : Oulujoki, Kemijoki, Tornionjoki et Kalixälven. D'autre part, les cours d'eau au bassin-versant de taille plus modeste enregistrent des débits annuels de l'ordre de 15 à 42 m³/s.

Comme on l'a mentionné auparavant, à bassin-versant comparable, les rivières dépourvues de toute forme d'exploitation ont souvent des amplitudes hydrologiques plus importantes entre les périodes de crue et les périodes d'étiage que les rivières exploitées. À titre d'exemple, la rivière naturelle Kuivajoki a une amplitude moyenne de 151

L/s/km² alors que la Oulujoki, exploitée de sa source à son embouchure par de multiples ouvrages hydroélectriques, a une faible amplitude de 20 L/s/km² (tableau 13).

Les régimes hydrologiques des rivières du Nord de la Finlande et de la Suède sont orchestrés par la prise en glace saisonnière de leur cours puis par leur fonte comme nous l'avons expliqué auparavant. Cependant, l'exploitation de certaines rivières et la régulation de leurs débits entraînent de profonds changements dans le comportement de leurs cours. La Tornionjoki et l'Oulujoki sont deux des principaux cours d'eau du bassin hydrographique de la Baie de Botnie. Le premier est naturel tandis que le second est exploité. Les graphiques 6a et 6b montrent les débits mensuels de ces deux cours d'eau de 2001 à 2005. Les précipitations pluvieuses et neigeuses, mesurées à la station où les débits sont enregistrés, sont également représentées afin d'établir la relation entre la variable hydrologique et le paramètre climatique. Les débits et les précipitations ont été mesurés dans les deux cas aux stations situées à l'embouchure des cours d'eau : à Karunki pour la Tornionjoki et à Merikoski pour l'Oulujoki.



Sources : Finnish Environment Institute
Finnish Institute of Marine Research

Élise Lépy

Graphiques 6 – Débits (courbes) de la Tornionjoki et de l'Oulujoki, précipitations (bâtonnets) et cycle glaciaire (segments gris) entre 2001 et 2005

Graphs 6 – Flows (lines) of Tornionjoki and Oulujoki rivers, precipitations (bars) and ice cycle (grey sections) from 2001 to 2005

Cours d'eau	Station	Débits (m ³ /s)				
		HHQ	MHQ	MQ	MNQ	NQ
Ähtävänjoki ^b	Herrfors	69	36	15	5	
*Lestijoki ^a	Saarenpää	191	94,2	11,1	2,13	1,29
Pyhäjoki ^a	Tolpankoski	472	284	29	4,47	3
*Siikajoki ^b	Länkelä	633	355	41,5	5,51	0,40
Oulujoki ^b	Merikoski	779	525	259	59,1	35
Iijoki ^a	Raasakka	1248	846	171	36,8	19
*Kuivajoki ^c	Ravaska	327	195	15,7	1,55	0,60
*Simojoki ^c	Simo	730	449	37,2	5,11	3
Kemijoki ^b	Isohaara	4824	3037	553	120	67
*Tornionjoki ^b	Karunki	3667	2197	387	81,4	57
Kalixälven ^d	Räktfors	2000	1386	280	49	
Råneälven ^d	Niemisel	763	395	39	7	
Piteälven ^d	Sikfors	1040	597	153	38	
Byskeälven ^d	Byske	291	219	42	11	

* Cours d'eau dépourvus de centrales et barrages hydro-électriques

a 1991 - 2005

b 1961 - 1990

c 1965 - 1990

d 1911 - 1990

MQ : débit moyen

MHQ : débit moyen en période de crue

MNQ : débit moyen en période d'étiage

HHQ : débit maximum absolu

NQ : débit minimum absolu

Élise Lépy

Sources : Finnish Environment Institute ; SMHI in Johansson, 2005

Tableau 12 – Données hydrologiques des cours d'eau se déversant dans la Baie de Botnie
 Table 12 – Hydrological data of watercourse flowing to the Bay of Bothnia

Cours d'eau	Station	Bassin -versant	Débit spécifique moyen	Amplitude hydrologique ^d
			(L/s/km ²)	(L/s/km ²)
Ähtävänjoki ^b	Herrfors	2000	7,50	15,50
*Lestijoki ^a	Saarenpää	1283	8,65	71,76
Pyhäjoki ^a	Tolpankoski	3408	8,51	82,02
*Siikajoki ^b	Länkelä	4283	9,69	81,60
Oulujoki ^b	Merikoski	22841	11,34	20,40
Iijoki ^a	Raasakka	14191	12,05	57,02
*Kuivajoki ^c	Ravaska	1279	12,28	151,25
*Simojoki ^c	Simo	3109	11,97	142,78
Kemijoki ^b	Isohaara	50683	10,91	57,55
*Tornionjoki ^b	Karunki	40100	9,65	52,76

* Cours d'eau dépourvus de centrales et barrages hydro-électriques

a 1991 - 2005

b 1961 - 1990

c 1965 - 1990

d L'amplitude hydrologique est la différence entre le débit spécifique moyen des crues et le débit spécifique moyen de l'étiage

Sources : Finnish Environment Institute ; SMHI in Johansson, 2005

Élise Lépy

Tableau 13 – Les débits spécifiques moyens et l'amplitude hydrologique des cours d'eau finlandais
 Table 13 – Average specific flow and hydrological amplitude of Finnish watercourses

Le profil hydrologique de la rivière Tornionjoki présente un pic de crue printanier qui a lieu en mai ou en juin et qui est dû à la débâcle des eaux fluviales et lacustres et à la fonte nivale. Un second pic de crue toutefois moins important a souvent lieu entre août et octobre suite aux précipitations estivales et automnales. La période d'étiage se déroule entre novembre et avril au moment où la prise en glace des eaux se fait. On remarque qu'en 2003, le pic de crue printanier a été moindre étant donné la faiblesse des précipitations hivernales (234 mm de septembre 2002 à avril 2003 ; alors que 357 mm ont été enregistrés de septembre 2001 à avril 2002). Au contraire à l'automne 2004, deux pics de crue ont eu lieu qui s'expliquent par l'abondance des précipitations estivales et automnales. Le profil hydrologique de la rivière Tornionjoki peut alors être considéré comme un profil typique des rivières naturelles du Nord de la Fennoscandie.

En revanche, la rivière Oulujoki qui elle, est exploitée, présente un profil hydrologique littéralement différent. Les pics de crue printanier n'apparaissent pas, au contraire le printemps et l'été sont les périodes d'étiage. Le graphique 6b révèle bien que la courbe des débits a une relation peu cohérente avec la fréquence des précipitations. En effet, alors que le cours d'eau est pris en glace pendant l'hiver, la station de Merikoski enregistre ses plus forts débits. La présence de la centrale hydroélectrique et du barrage explique l'irrégularité des pics de crue et surtout le moment où ils ont lieu (photographies 12). Effectivement, la consommation en énergie électrique est très importante en hiver puisque d'une part la région est plongée pour une grande partie de la journée dans la nuit polaire, et d'autre part le froid hivernal intense fait augmenter la consommation de chauffage électrique. La centrale hydroélectrique fonctionne alors doublement en hiver. Cependant, les conditions hydrologiques hivernales ne se prêtent pas à une exploitation aisée de l'eau de rivière puisque celle-ci est partiellement prise en glace. Ainsi le barrage permet d'accumuler l'eau libre située en deçà de la couche glacielle qui est par la suite acheminée aux turbines de la centrale pour produire de l'énergie. Cette centrale lisse le débit naturel de la rivière par effet retard et introduit des variations artificielles de débit par lâchers d'eau. Ainsi le laps de temps nécessaire à l'accumulation d'eau entraîne des lâchers d'eau brutaux qui ont pour effet le dégel temporaire des eaux situées en aval du barrage. Non seulement, les ouvrages hydroélectriques modifient le débit naturel d'un cours d'eau, mais aussi ils jouent un rôle considérable sur le comportement des glaces de ce même cours d'eau.



Photographies 12 – La centrale hydroélectrique et le barrage de Merikoski (Oulu) – 22 février 2009
 Pictures 12 – Merikoski hydropower plant and dam, Oulu – February 22nd 2009

4.3.4 – Les conditions glacielles fluviales et lacustres dans le Nord de la Finlande

La formation de la couverture glacielle est un élément important de la plupart des rivières de Fennoscandie. Dans le Nord de la Fennoscandie, le réseau hydrographique est souvent pris en glace pendant six à sept mois. Les premières embâcles ont lieu en octobre alors que les dernières glaces disparaissent à la fin du mois de mai voire en juin. Le gel des eaux fluviales commence sur les rives puis progressivement atteint la partie centrale du cours d'eau là où l'écoulement est rapide (Hyvärinen et Kajander, 2005, 142). Les lacs, quant à eux, sont couverts de glace pendant plus de six mois (graphiques 8 et 9) enregistrant une épaisseur de leur couverture de glace comprise entre 50 et 70 cm pendant un hiver qualifié de « normal » (*ibid.*, 146). Pendant la période 1961-1990, Kuusisto (1994, 33) a mesuré 69 centimètres d'épaisseur moyenne maximale de glace pour les lacs de Laponie et 64 centimètres pour ceux de la région de Kainuu (d'Oulu à la frontière russe). Le graphique 10 indique l'épaisseur maximale enregistrée au cours des hivers 1995/96 à 2004/05. Il est difficile de dégager une tendance significative (Korhonen, 2006, 347) de l'épaisseur de glace d'un lac au cours de cette décennie puisque les dynamiques et les causes de la formation de la couche glacielle sont complexes (Hyvärinen, 2003, 83). En effet, l'épaisseur de glace peut être régulée par différents paramètres telle la présence de la neige sur la glace (Hyvärinen et Kajander, 2005, 146), dont l'effet isolant est étudié dans le chapitre suivant.

L'exploitation d'un cours d'eau a un impact important sur les processus d'embâcle et de débâcle. En effet, si la rivière présente un réservoir en amont d'un barrage, l'eau prend en glace plus rapidement, l'embâcle est ainsi plus précoce en amont du barrage qu'à son aval. En revanche en aval, les lâchers d'eau entraînent des embâcles plus tardives et parfois même une alternance gel/dégel de ces eaux situées en aval. La période la plus dramatique du cycle glacial dans les rivières les plus septentrionales est la

phase de fonte des glaces surtout là où le couvert de glace est bien épais. Au moment de la débâcle, les blocs de glaces s'écoulent vers l'aval portés par le courant. Cependant il arrive que ces blocs de glace forment des obstacles au bon écoulement de la rivière et qu'ils causent ainsi de désastreuses crues rapides (*ibid.*, 142). C.E. Johansson (2005, 338) relate une phase typique de débâcle de la rivière naturelle Tornionjoki couverte par les glaces plus de la moitié de l'année. Les débâcles de cette rivière et de ses affluents sont brutales, souvent accompagnées d'embâcle quand la fonte nivale est rapide. Les morceaux de glaces flottantes causent de fortes érosions et déformations des rives déplaçant des blocs erratiques et parfois même des constructions en bois. De plus, la présence de barrages ne facilite pas le bon écoulement du cours d'eau puisque des embâcles peuvent se créer au niveau de ces ouvrages.

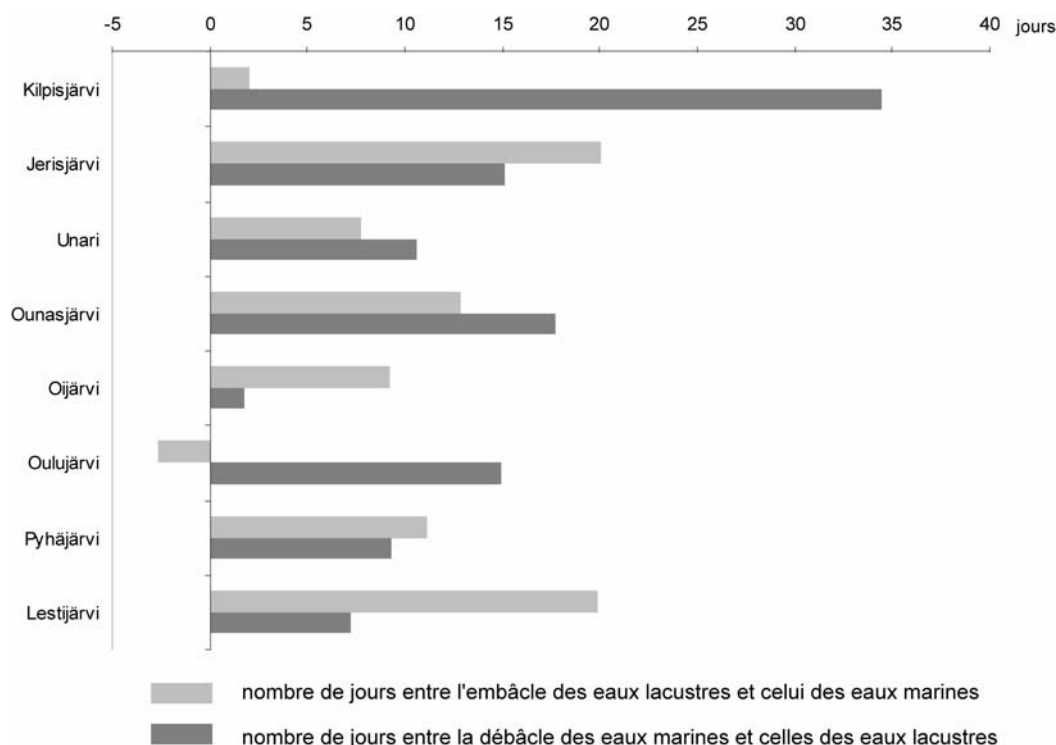
Il semble ici surtout opportun d'analyser l'impact des embâcles et débâcles fluviales et lacustres sur les eaux estuariennes et littorales de la Baie de Botnie. Pour cela, il est préférable dans un premier temps de comparer les temporalités des processus glaciels des deux domaines, marin et lacustre, puis d'analyser leurs caractéristiques glacielles.

Les graphiques 8 et 9 comparent les dates de prise en glace et de fonte de certains lacs et des stations côtières les plus proches de l'embouchure du cours d'eau dans lequel leurs eaux se déversent pour une période de trente ans, de 1975/76 à 2004/05. Ainsi, six bassin-versants finlandais sont représentés : celui de la Tornionjoki, de la Kemijoki, de la Kuivajoki, d'Oulujoki, de la Pyhäjoki et de la Lestijoki. Les données collectées sur les glaces lacustres proviennent de *Suomen Ympäristö* (Environnement Finlande) qui, tous les hivers, fournit ces informations. Ainsi, il est important de préciser que les dates d'embâcle correspondent aux moments où la prise en glace de la couverture glacielle permanente a lieu en dépit des périodes de gel et de dégel qui se produisent avant. Les dates d'embâcle coïncident avec la disparition des dernières glaces flottantes. Korhonen (2007, 181) souligne que la plus longue série de données sur les glaces fluviales et lacustres a été observée pour la rivière Tornionjoki depuis 1693.

De manière générale, les comparaisons sont beaucoup plus nettes en ce qui concerne la débâcle que l'embâcle. Les eaux lacustres sont souvent les premières à prendre en glace en regard des eaux marines, mais elles sont aussi les dernières à disparaître. La situation géographique des lacs par rapport aux côtes de la Baie de Botnie a son importance. Effectivement, si l'on étudie le cas du bassin-versant de la Tornionjoki, on constate que les lacs Jerisjärvi et Kilpisjärvi, situés à la frontière avec la Suède et la Norvège, prennent en glace en moyenne (1975-2005) vingt jours plus tôt pour le premier et quelques jours plus tôt pour le second que les eaux côtières. Au moment de la débâcle, le processus inverse se produit, les eaux littorales dégèlent plus précocement que celles des deux lacs avec un décalage de deux semaines en moyenne pour le lac Jerisjärvi et de

plus d'un mois pour le lac Kilpisjärvi (graphique 7). Dans ce cas-ci, la longitudinalité de la rivière Tornionjoki permet une fonte suivant la logique Sud – Nord. Les autres lacs qui servent également de réservoirs, répondent à la même logique puisque leurs caractéristiques géographiques sont plus favorables à l'englacement (eau douce, courants moins importants...). Seul le lac Oulujärvi connaît une prise en glace de ses eaux plus tardive que les eaux de la station littorale d'Oulu : ici, le profil du bassin-versant de la Oulujoki est orienté Sud-Est – Nord-Ouest, ce qui explique en partie cette prise en glace plus tardive. Et pourtant cette position latitudinale n'empêche pas les lacs du bassin-versant de la Oulujoki de dégeler après les eaux marines avec en moyenne deux semaines de décalage. En revanche un cas particulier est celui d'un lac proche de l'embouchure du cours d'eau dans lequel il se déverse, et situé à une latitude similaire. Ainsi, le lac Oijärvi et la station de Kemi qui subissent des conditions météorologiques semblables, ne respectent plus exactement la même logique même s'il est vrai qu'en période d'embâcle le lac Oijärvi prend en glace plus tôt. En revanche, il n'existe pas d'ordre significatif de fonte concernant la débâcle, les courbes étant très irrégulières.

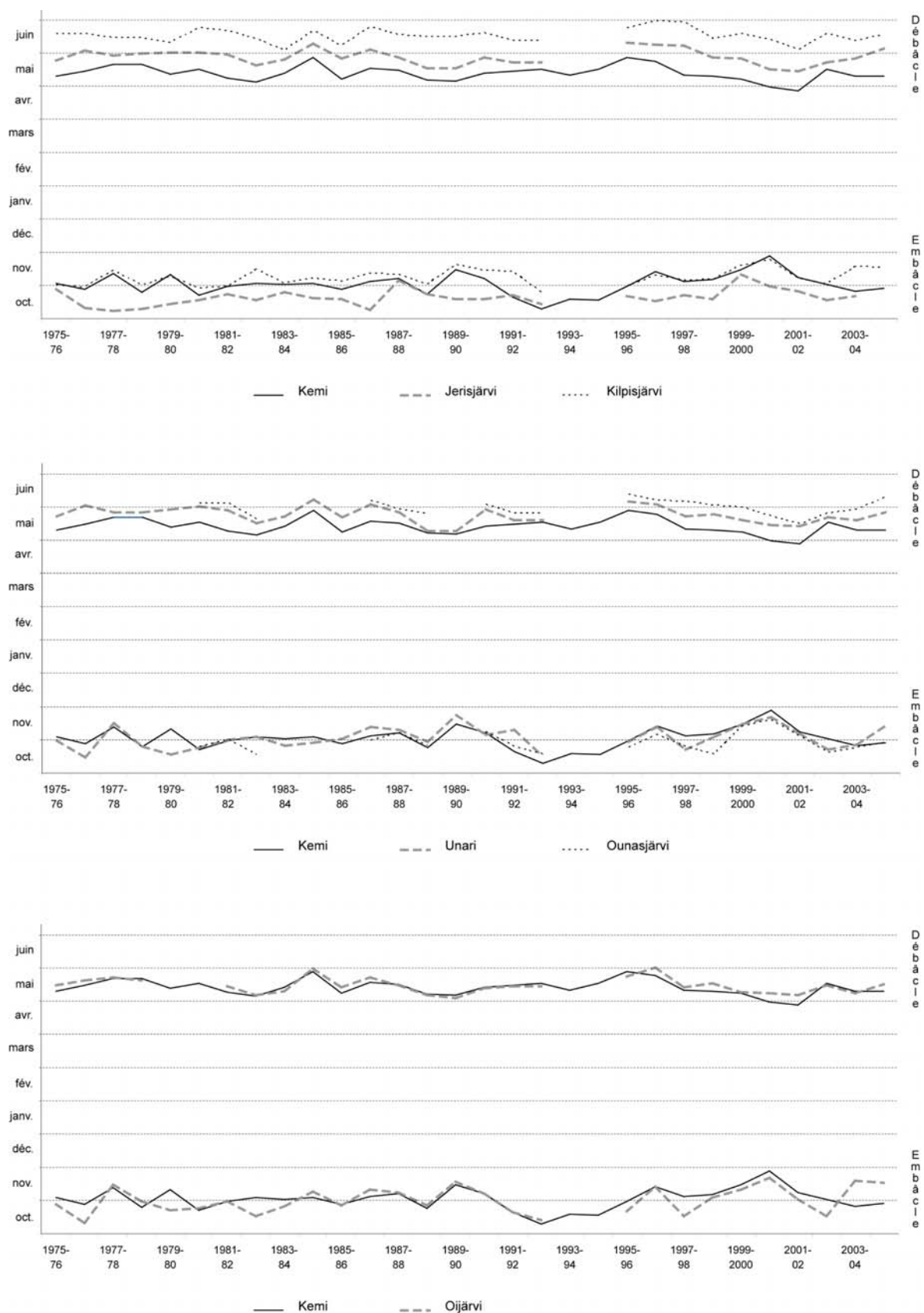
Même si une logique d'ensemble se dégage, il faut certainement considérer les caractéristiques morphologiques de chaque lac pour conduire à une meilleure interprétation de ces phénomènes.



Réalisé par Élise Lépy

Graphique 7 – Nombre de jours entre les prises en glace et les fontes des eaux marines et lacustres entre 1975 et 2005

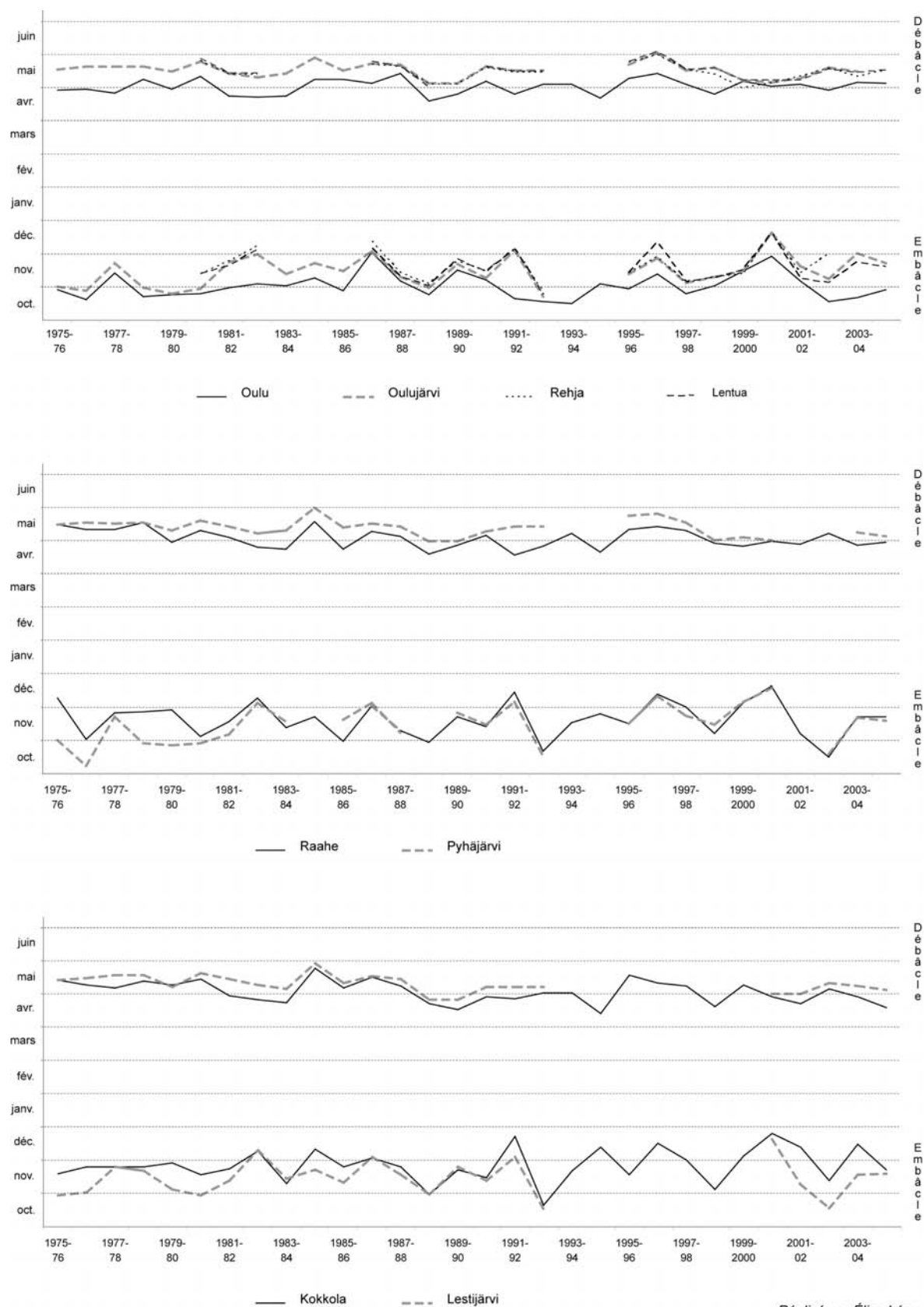
Graph 7 – Number of days between ice freezing and melting of marine and lake waters from 1975 to 2005



Réalisé par Élise Lépy

Graphiques 8 – Dates de la prise en glace et de la fonte des eaux marines et lacustres des bassin-versants de la Tornionjoki, de la Kemijoki et de la Kuivajoki de 1975 à 2004

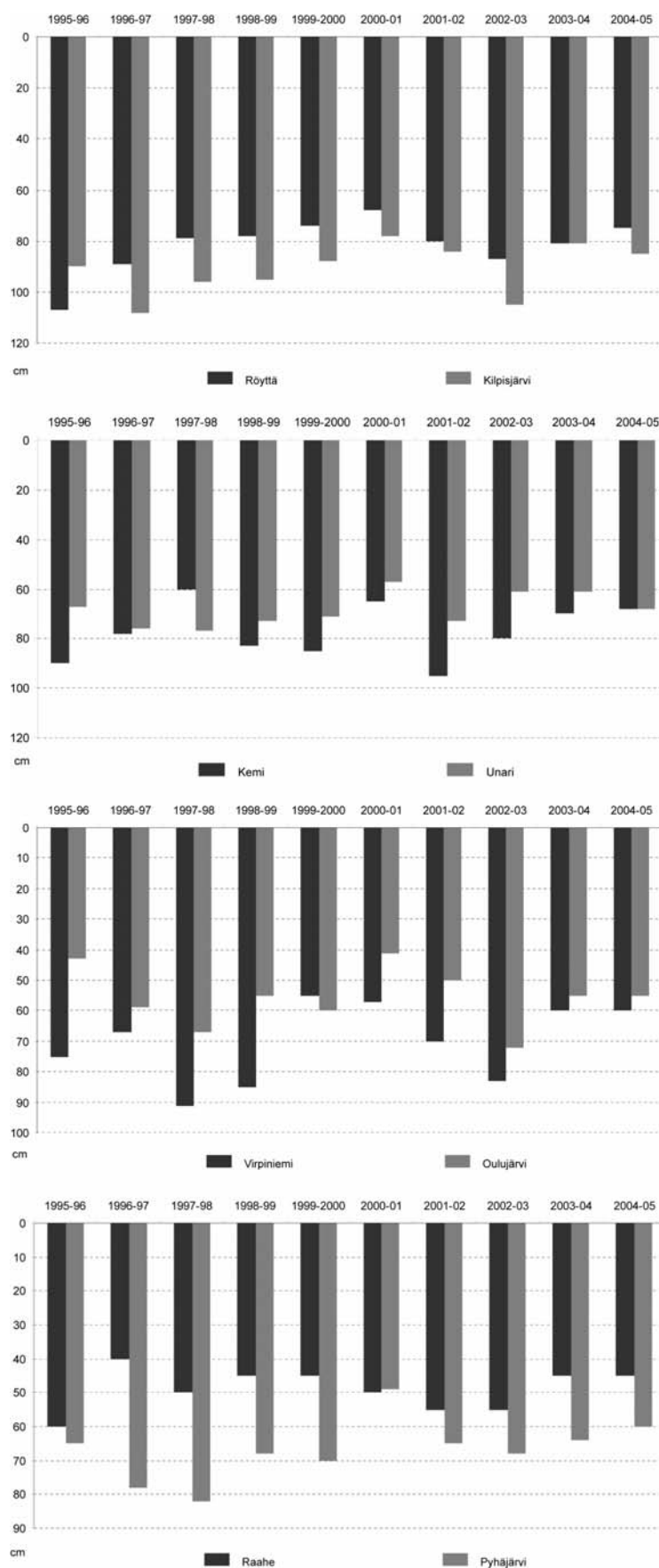
Graphs 8 – Ice freezing and melting dates of marine and lake waters of Tornionjoki, Kemijoki and Kuivajoki watersheds from 1975 to 2004



Réalisé par Élise Lépy

Graphiques 9 – Dates de la prise en glace et de la fonte des eaux marines et lacustres des bassin-versants de l'Oulujoki, de la Pyhäjoki et de la Lestijoki de 1975 à 2004

Graphs 9 - Ice freezing and melting dates of marine and lake waters of Oulujoki, Pyhäjoki et Lestijoki watersheds from 1975 to 2004



Réalisé par Élise Lépy

Graphiques 10 – Épaisseur du couvert de glace des eaux marines et lacustres de 1995 à 2005
 Graphs 10 – Ice thickness of marine and lake waters from 1995 to 2005

L'une des principales caractéristiques glacielles de tout plan d'eau est l'épaisseur de son couvert de glace. Les mesures d'épaisseur de glace dans un lac se font au moins à 50 mètres de la rive tous les 10, 20 et 30 de chaque mois. La plus longue série de mesures remonte aux années 1910 (Korhonen, 2007, 187). Les graphiques 9 présentent quatre cas de comparaison entre l'épaisseur de glace d'un lac et celle de la station côtière la plus proche de l'exutoire du bassin-versant concerné de 1995/96 à 2004/05 : celui de Kilpisjärvi et de Ryöttä, de Unari et de Kemi, de Oulujärvi et de Virpiniemi, et enfin de Pyhäjärvi et de Raahe.

Au cours de la dernière décennie, le lac Kilpisjärvi, situé au 69^{ème} parallèle Nord, a enregistré un couvert de glace souvent supérieur à 80 centimètres et à celui des eaux marines de Ryöttä. Sa position géographique septentrionale explique l'importance de ce caractère glacial. Plus au Sud, le lac Oulujärvi a connu de nombreuses irrégularités de l'épaisseur maximale de glace mesurée pendant dix ans et un taux de croissance du couvert de glace inférieur à celui de Virpiniemi, station située près d'Oulu. En revanche, le lac Pyhäjärvi présente un cas contraire puisque son couvert de glace a de manière générale été plus important que celui mesuré à Raahe. Dans ces deux derniers cas, la position latitudinale ne saurait expliquer ces phénomènes puisque Pyhäjärvi est plus méridional qu'Oulujärvi. Cependant la taille du plan d'eau à prendre en glace est un facteur important : le lac Oulujärvi est bien plus grand. De plus, la présence d'une série d'ouvrages hydroélectriques en amont du lac Oulujärvi ne peut qu'entraver le taux de croissance de la couche glacielle, même si le lac Pyhäjärvi est doté d'un seul ouvrage.

Effectivement le gel précoce des lacs a un impact direct sur les débits des cours d'eau qui entament alors la période d'étiage des rivières naturelles. De ce fait, les plus faibles apports en eau terrestre aux embouchures permettent des conditions de gel plus favorables des eaux estuariennes et littorales car il y a un moindre dessalement. Cependant, quand le cours d'eau est exploité, les lâchers d'eau ne facilitent pas l'embâcle de ces eaux marines.

En période de fonte des eaux terrestres, les plus importants débits ont parfois lieu alors que les eaux côtières sont toujours prises en glace. L'eau fluviale libre de glace se déverse sous la banquise côtière. Le panage d'eau douce sous couvert de glace affecte la durée du cycle glacial de la banquise côtière située près des embouchures des rivières. L'eau douce des rivières diminue le taux de salinité surtout dans les espaces côtiers peu profonds et favorise alors un englacement plus précoce de leurs eaux salées environnantes (Granskog *et al.*, 2005, 194). Mats Granskog *et al.* ont étudié le cas de la rivière Siikajoki. Les crues printanières correspondent souvent à la moitié du module annuel et surviennent quand les eaux côtières de la Baie de Botnie sont encore gelées. Dans le cas de la rivière Siikajoki, la panache d'eau douce est compris entre 1 et 2 mètres et s'étend jusqu'à une dizaine de kilomètres en mars 2001. En avril 2002 le panache est beaucoup

plus important du fait des plus forts ruissellements. En été le panache n'est presque plus existant puisqu'après la fonte des glaces marines la colonne d'eau douce s'est mélangée avec celle d'eau marine et a donc fait baisser le taux de salinité des eaux proches de l'embouchure.

Ainsi le « détachement de terre » mentionné par A. Guilcher et J. Beaujeu-Garnier (1958, 141) est effectivement dû aux eaux de fonte terrestre mais aussi à celles exploitées par les barrages hydroélectriques : ces détachements sont donc facilités par les lachers d'eau de ces ouvrages vers le mois de mars (exemple de l'embouchure de la Oulujoki sur l'image satellitaire 1).

4.4 – CONCLUSION

En définitive, l'étude des processus saisonniers de prise en glace des eaux marines et de leur fonte reflète une variabilité spatio-temporelle notable en Mer Baltique. L'analyse détaillée des cas de la Baie de Botnie et du Golfe de Riga confirme cette variabilité plus marquée dans les eaux méridionales que septentrionales. D'autre part, la prise en considération des eaux continentales qui connaissent des processus saisonniers similaires en Finlande et en Suède, est importante pour anticiper les impacts lors de leur écoulement dans la mer, notamment au niveau des embouchures des cours d'eau.

Globalement, les eaux du Golfe de Riga sont plus sensibles aux changements atmosphériques que celles de la Baie de Botnie. Cela s'explique avant tout par la relation complexe qui existe entre les conditions météorologiques et climatiques avec la banquise.

La relation des phénomènes glacio-marins avec le climat et la météorologie

On a pu évoquer dans le chapitre précédent quelques facteurs responsables de l'englacement de la Mer Baltique et de sa variabilité. Il est certain que le contexte géomorphologique majeur, présenté en première partie de ce travail, tient une place importante dans la prise en glace des eaux marines de la Baltique (découpage des côtes et profondeur des fonds marins). Cependant d'autres facteurs de forçage d'origine naturel peuvent expliquer la variabilité des processus glacio-marins et leurs variations.

La prise en glace de la mer est tout d'abord un phénomène d'origine climatique. La continentalité du climat de la Mer Baltique décrite par I. Roussel (1989) introduit des températures hivernales négatives qui ont un rôle fondamental sur la formation de la glace de mer. Toutefois, la prise en glace de la mer est, de façon générale, liée aux conditions climatiques et à leurs variations. Mais des conditions météorologiques ponctuelles et locales peuvent aussi agir sur la variabilité de l'englacement.

Par ailleurs, on peut dire que la banquise, autant comme effet que comme agent, forme un composant majeur du système climatique des régions polaires et subpolaires (Leppäranta, 1993, 5 ; Haapala, 2000b, 7).

5.1 – QUELQUES RAPPELS DES CONDITIONS CLIMATIQUES HIVERNALES EN MER BALTIQUE

Le climat de la Mer Baltique est ancré dans la circulation générale de l'atmosphère de l'hémisphère Nord avec une circulation d'Ouest qui transporte des masses d'air maritime et humide vers les domaines septentrionaux du bassin baltique mais qui s'affaiblit vers l'Est et le Nord en laissant place à des conditions climatiques continentales (Haapala *et al.*, 2001a, 555 ; HelCom, 2007a, 12). Malgré une prédominance de la maritimité du climat sur les côtes Sud et Sud-Ouest de la Baltique et l'accroissement du degré de continentalité vers l'Est perturbé par la présence de la mer, les influences continentales dominent largement dans le bassin de la Mer Baltique (Roussel, 1983, 47). Ainsi, I. Roussel (1983, 49) considère la Baltique comme une « *zone de transition entre le domaine océanique et le domaine continental, transition entre le domaine polaire et la zone tempérée* ».

Le bassin de la Mer Baltique est un espace d'échange permanent des masses d'air (HelCom, 2007a, 12) comme on l'a déjà remarqué en première partie. En hiver, la Baltique est « *une mer continentale marquée de l'empreinte anticyclonique et de l'inhibition pluviométrique en ambiance froide* » (Pagney, 1989, 168). Il est vrai que les facteurs liés à la circulation atmosphérique générale qui se traduit par la présence d'anticyclones dynamiques dont la localisation dépend de l'activité du front arctique et du front polaire, et que les facteurs locaux tels la présence des Alpes scandinaves et un bilan radiatif déficitaire dû à l'enneigement et l'englacement de la mer, favorisent la prééminence des conditions anticycloniques à cette saison (Roussel, 1983, 49).

De plus, le substratum géographique est un support actif du climat. Ainsi, alors que les masses continentales favorisent la formation d'anticyclone, la mer, libre de glace, favorise l'instabilité (Pagney, 1970, 26 ; Roussel, 1983, 49). De ce fait, en période hivernale, l'englacement de la mer n'a plus les mêmes propriétés d'influence sur l'atmosphère et les échanges mer – atmosphère s'en trouvent modifiés, à l'image d'une véritable « continentalisation » de l'espace marin par le couvert glaciaire.

5.2 – L'INFLUENCE DES FORÇAGES ATMOSPHERIQUES ET THERMIQUES SUR L'ENGLACEMENT DES ESPACES MARINS DE LA MER BALTIQUE

Alors que les facteurs morphologiques comme la configuration des côtes et la profondeur des fonds marins sont relativement stables à une échelle de temps courte géologiquement parlant (même si effectivement le rebond isostatique a un lent effet sur la morphologie côtière), les facteurs météorologiques (température, neige, vent ...), eux, sont dynamiques et ont alors un impact immédiat sur l'état des eaux marines de la Baltique. Les facteurs océanographiques tels les courants marins et la salinité sont largement liés aux éléments météorologiques qui dépendent directement de la circulation générale de l'atmosphère.

Martine Tabeaud et Claude Kergomard (1990, 300) ont observé que « *la variabilité interannuelle ou intrasaisonnière de l'extension des glaces marines est avant tout sous la dépendance d'un « forçage » à la fois dynamique et thermique de la circulation atmosphérique* ». Effectivement, les coulées d'air froid venant du pôle et de Sibérie favorisent la formation de la glace de mer alors que l'air en provenance des latitudes moyennes entraîne davantage leur fonte. Cependant, l'explication est bien plus complexe puisque le forçage atmosphérique dépend de la position des centres d'action dans l'hémisphère Nord et bien entendu de l'oscillation Nord-Atlantique (NAO). De nombreux auteurs ont établi un lien étroit entre l'état des glaces de mer et la circulation atmosphérique générale représentée dans ce cas-ci par la NAO.

5.2.1 - L'oscillation Nord-Atlantique (NAO)

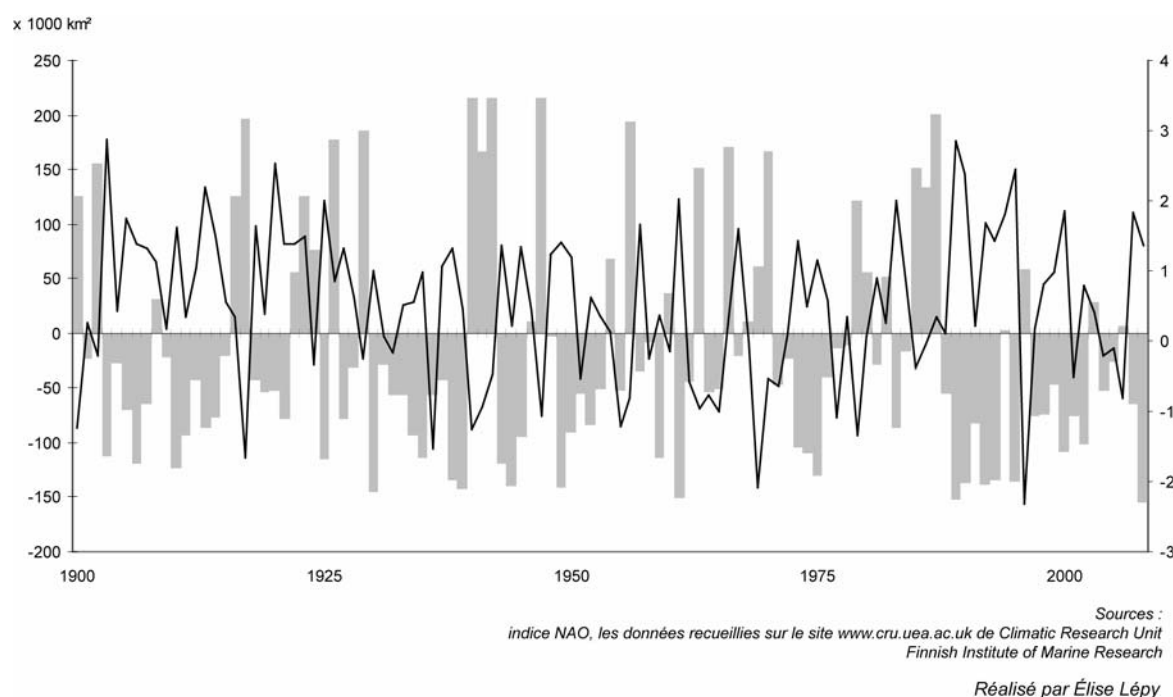
La NAO est un phénomène atmosphérique et océanique qui « *représente une redistribution de masse atmosphérique entre les régions arctiques ou subarctiques et les régions subtropicales de l'Atlantique* » (Cassou et Terray, 2003). La NAO est en fait une oscillation de la pression atmosphérique entre la dépression d'Islande et l'anticyclone des Açores (Tourre, 2002, 8), dont l'impact est plus fort pendant les mois d'hiver. Son indice noté NAO_i , mesure la différence de pression entre Lisbonne (Portugal) et Stykkisholmur (Islande) (Omstedt et Chen, 2001, 4494). Il est ainsi possible d'observer deux phases de la NAO.

Quand la NAO se trouve dans une phase dite positive, les deux centres d'action se renforcent : la dépression d'Islande se creuse et l'anticyclone des Açores se gonfle et s'intensifie. Dans ces conditions, les vents dominants d'Ouest (westerlies) sont renforcés en hiver en Europe septentrionale (Johansson *et al.*, 1998, 119). Les hivers sont plus doux avec des routes dépressionnaires déplacées vers le Nord et des tempêtes plus fréquentes et plus violentes, entraînant des conditions plus humides sur la Fennoscandinavie. Au contraire, en phase négative, les deux centres d'action s'affaiblissent. Par conséquent, les vents d'Ouest sont plus faibles et les tempêtes plus rares en Europe du Nord. Les trajectoires des perturbations atlantiques sont déplacées vers le Sud et les régions nordiques sont alors sous l'influence de l'anticyclone de Sibérie avec des hivers plus rigoureux, secs et froids (Tourre, 2002, 8 ; Jaagus, 2006, 170 ; Vihma et Haapala, 2009, 133). Pendant les hivers doux, les masses d'air chaudes associées aux perturbations d'Ouest provenant de l'Atlantique dominant le climat de la Baltique. En revanche, pendant les hivers sévères, ce sont de forts anticyclones qui s'installent sur la région (Jevrejeva et Moore, 2001, 4503).

Gerhard Kolowsky et Rüdiger Glaser (1999, 188) ont démontré que la sévérité de l'englacement hivernal de la Baltique était fortement corrélée à l'intensité des vents d'Ouest puisque la formation abondante de glace marine est favorisée par la faiblesse de ces vents. La position des hautes pressions sur l'Europe du Nord a un rôle important sur l'intensité de l'englacement. Quand l'influence anticyclonique s'étend jusqu'en Scandinavie, la Mer Baltique reçoit des masses d'air arctique très froides et sèches en provenance du Nord de la Russie. De ce fait, le contexte atmosphérique facilite la prise en glace de l'eau de mer. La sévérité de l'englacement dépend alors de l'état de la NAO entre décembre et mars.

Birger Tinz (1996, 324) a établi une forte relation entre l'indice de la NAO et l'extension des glaces en Mer Baltique. Les coefficients de corrélation entre l'extension maximale de la surface englacée et la pression atmosphérique au niveau de la mer que

l'auteur a calculé, révèlent une corrélation significative pendant les seuls mois d'hivers, de décembre à mars. Le graphique 11 montre en effet une bonne relation inverse entre l'extension maximale des glaces de mer et l'indice de la NAO pendant les mois d'hiver de décembre à mars. Les anomalies positives de l'extension des glaces correspondent très souvent à une phase négative de la NAO comme pour les hivers 1940-41-42. Ainsi quand l'indice de la NAO est négatif, les vents d'Ouest sont plus faibles que la normale et la banquise s'étend sur une grande surface. Anders Omstedt et Deliang Chen (2001, 4496) ont également étudié les relations entre les deux variables et ont observé que les plus fortes corrélations avaient eu lieu à la fin du XIX^{ème} siècle et ces 30 dernières années avec un coefficient de corrélation linéaire de -0,54. Durant le siècle passé, les coefficients de corrélation ont considérablement varié, de -0,3 à -0,7.



Graphique 11 – Anomalies de l'extension maximale de l'englacement de la Mer Baltique (bâtonnets) et la variation de l'indice de la NAO (courbe) pendant les mois d'hiver (décembre – mars) de 1900 à 2008
 Graph 11 – Maximum ice extent anomalies of the Baltic Sea (sticks) and NAO index variation (curve) during winter months (december – march) from 1900 to 2008

L'extension maximale de la banquise de la Baltique est donc fortement liée à la circulation atmosphérique générale. Alors que les vents d'Ouest ont un impact négatif sur l'extension des glaces de la Baltique, les forts vents de Nord et d'Est portés par les hautes pressions Nord-orientales apportent des températures extrêmement basses qui facilitent la formation de la banquise. Dans leur étude qui porte sur l'évolution du climat de la Mer Baltique depuis deux siècles, A. Omstedt *et al.* (2004, 214) insistent bien sur le déplacement général des basses pressions vers le Nord et de l'augmentation de la fréquence des vents d'Ouest, ce qui explique en partie la réduction de l'extension maximale de la banquise ces

dernières années. Les conditions glacielles de la Baltique sont ainsi largement contrôlées par les forçages atmosphériques qui influent directement sur la température de l'air. D. Chen et C. Hellström (1999, 513) ont démontré que la NAO était bien corrélée aux températures de l'air en Europe du Nord. Ainsi, des modifications mineures de ces températures peut conduire à d'importants changements des caractéristiques glacielles comme l'extension de la banquise et l'épaisseur de la glace (Haapala *et al.*, 2001a, 555).

5.2.2 – Le rôle fondamental de la température

La température de l'air a un impact direct sur la température de surface de l'eau quel que soit l'effet des courants marins. Elle a ainsi un rôle essentiel dans la formation et la fonte de la banquise, rôle qui va être démontré à travers trois variables : l'extension maximale des glaces, l'épaisseur de la glace et le cycle glaciaire.

5.2.2.1 – L'englacement de la Mer Baltique et la température de l'air

Il s'agit ici de mettre en évidence la relation corrélative entre la température de l'air et l'extension maximale des glaces puis d'établir le lien entre la sévérité de l'étendue de la banquise et celle des températures. Cela implique de classer les hivers et de dégager les grandes tendances de ces dernières années.

5.2.2.1.1 – La relation température de l'air / extension des glaces marines

Comme plusieurs études antérieures (Palosuo, 1953 ; Seinä, 1993 ; Omstedt et Nyberg, 1996 ; Tinz, 1996 ; Haapala et Leppäranta, 1997 ; Schrum et Backhaus, 1999) l'ont démontré, la diminution des températures de l'air a une forte influence sur la température de l'eau de surface et donc logiquement sur les conditions glacielles.

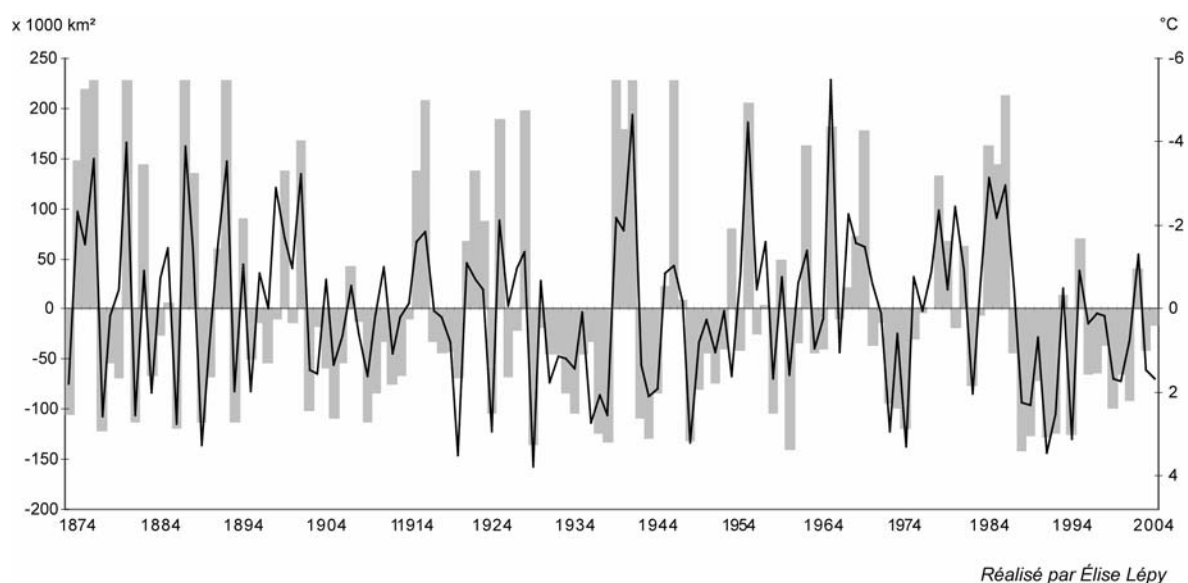
E. Palosuo (1953, 29) a été l'un des premiers auteurs à publier les résultats sur la bonne corrélation entre l'extension des glaces et la température moyenne hivernale prise à Stockholm entre 1756 et 1950. Selon M. Leppäranta (1993), il aurait démontré qu'un changement de température de 1°C correspond à un changement de 15 % de l'extension des glaces. Afin de compléter son étude qui ne présente aucun calcul de corrélation mais seulement un graphique, on a calculé ici les coefficients de corrélation entre l'extension maximale de la banquise et les températures moyennes à Oulu et à Riga pour la période 1874 – 2005.

Les corrélations obtenues entre les températures moyennes mensuelles de novembre à avril et la surface englacée sont satisfaisantes. Toutefois la corrélation est plus forte à Oulu qu'à Riga : respectivement 0,84 et 0,79. La situation septentrionale et d'abri

de la station d'Oulu lui permet d'être moins exposée aux influences océaniques que la station de Riga, soumise à plus de variations. Le contexte géographique et climatique des deux stations explique par conséquent cette légère différence des coefficients de corrélation.

Ainsi, les fluctuations de la surface englacée s'identifient aux fluctuations thermiques comme le précise I. Roussel (1987, 289). L'analyse du graphique 12 indique d'ailleurs que la courbe des températures moyennes hivernales suit les variations de celle des anomalies de l'extension des glaces. Ainsi, l'hiver 1988-89, qui a eu l'englacement le plus faible depuis 1720, correspond à un « réchauffement » des températures enregistrées à Oulu. De même, les hivers 1941-43 qui ont eu des englacements importants, correspondent à des baisses de températures hivernales significatives. Cependant les disharmonies existant sur le graphique montrent bien que l'explication est souvent plus complexe. En effet, il apparaît des cas exceptionnels d'hiver où la courbe des températures ne s'aligne pas avec l'histogramme de l'extension de la glace. Les hivers 1926-28 ont eu un englacement inférieur à la moyenne (192 940 km²) et pourtant les températures hivernales étaient plus froides. Au contraire, l'hiver 1953-54 a connu un englacement plus important malgré une augmentation des températures hivernales par rapport à la moyenne (-5,89°C). D'autres facteurs d'origine météorologique et marine interviennent donc dans la glaciellisation de la Mer Baltique.

Toutefois, B. Tinz (1996) signale que 84,6% de la variabilité totale de l'étendue des glaces peuvent être attribués à la variation de la température de l'air sur la Mer Baltique pendant l'hiver. Ceci implique donc que les anomalies de l'extension maximale des glaces peuvent être dues à la variabilité des températures et à la sensibilité de la banquise aux changements de températures comme le souligne bien le graphique 12. La forte corrélation entre ces deux variables est due principalement à l'important degré de couplage entre la banquise de la Mer Baltique et les conditions météorologiques locales (Leppäranta, 1993, 7).



Graphique 12 – Écarts à la moyenne de l'extension maximale (bâtonnets) du couvert de glace de la Mer Baltique et des températures (courbe) moyennes hivernales (novembre-avril) à la station d'Oulu de 1874 à 2005

Graph 12 – Deviation from the average maximum ice extent (sticks) of the Baltic Sea and from average winter temperatures (curve, november – april) at Oulu from 1874 to 2005

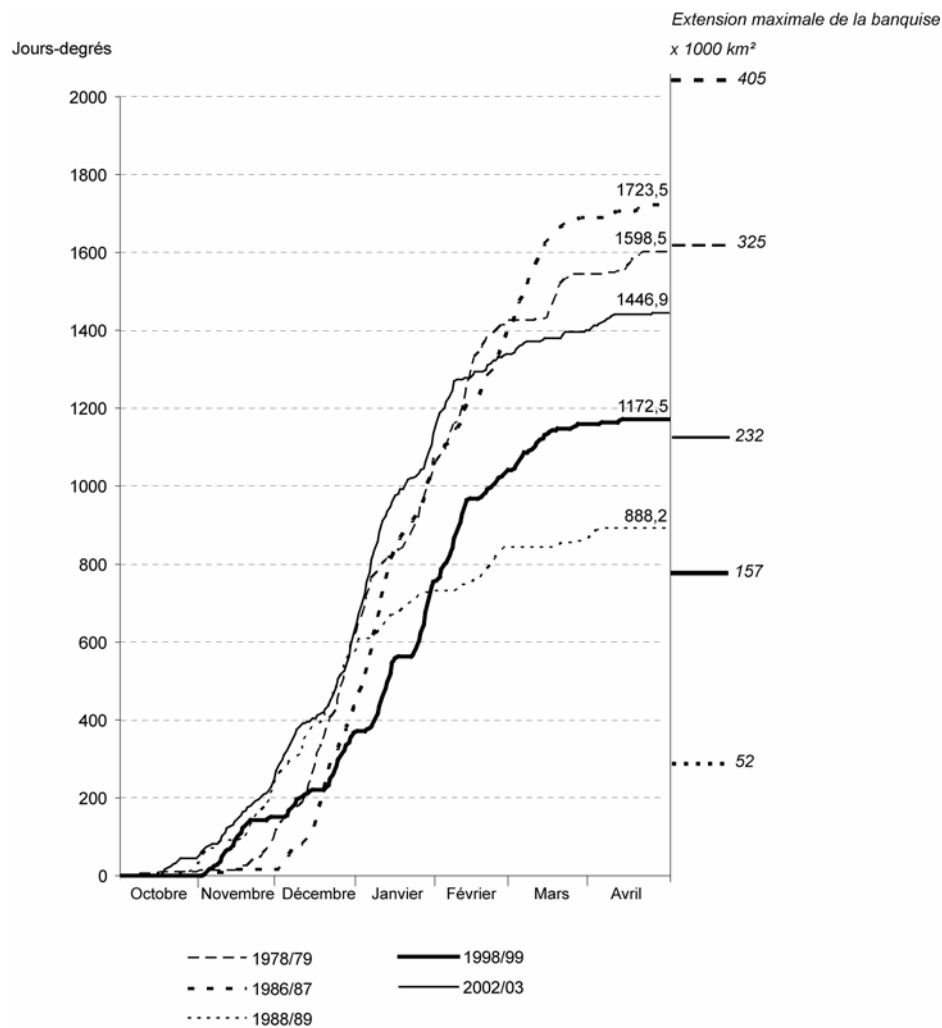
5.2.2.1.2 – L'intensité de l'hiver

La question qui se pose alors est de savoir si un hiver thermiquement très froid a pour conséquence une prise en glace totale des eaux de la Baltique, et si, au contraire, pendant un hiver doux, l'englacement est minime. Il s'agit donc de s'interroger sur l'existence d'un lien établi entre la sévérité de l'englacement et celle de l'hiver. On entend par sévérité de l'hiver, l'intensité du froid qui peut s'exprimer graphiquement par la somme des jours-degrés au-dessous de 0°C. Cette somme est probablement l'indicateur le plus important de la sévérité d'un hiver (Jaagus, 2006, 172, 176) et elle se calcule en additionnant toutes les températures moyennes quotidiennes négatives d'un hiver et en omettant les températures positives. Ce paramètre a une large variation temporelle.

La somme cumulée des jours-degrés d'octobre à avril à Oulu (graphique 13) montre clairement les disparités entre les saisons sélectionnées mais elle souligne surtout la forte relation qui existe entre l'intensité du froid et l'extension maximale des glaces de la Mer Baltique. Ainsi, la somme des jours-degrés négatifs était respectivement de 888, 1172, 1447, 1598 et 1723 pour les hivers 1988/89, 1998/99, 2002/03, 1978/79 et 1986/87 alors que la banquise s'étendait respectivement sur 52 000, 157 000, 232 000, 325 000 et 405 000 km². Ainsi l'hiver 1988/89 qui a eu une somme des jours-degrés négatifs équivalente à 888, a connu l'un des plus faibles englacements du XX^{ème} siècle, soit 52 000 km². Au contraire, l'hiver 1986/87, intensément froid, a enregistré une extension

maximale des glaces supérieures à 400 000 km², soit la quasi-totalité de la superficie de l'espace marin.

Le cas de ces cinq hivers qui ont été sélectionnés pour leur glaciellisation distincte, confirme donc bien que la sévérité de l'englacement a pour raison principale celle des températures. De plus, il faut noter que l'évolution temporelle des courbes du graphique 13, révèle que le début de la saison hivernale de l'hiver 2002/03 était beaucoup plus froid que celui de 1986/87. C'est à la fin du mois de décembre et au début du mois de janvier que la sévérité de l'hiver 1986/87 est devenue plus évidente.



Réalisé par Élise Lépy

Graphique 13 - L'intensité du froid à Oulu (somme cumulée des jours-degrés au-dessous de 0°C) et l'extension maximale de la banquise pendant les hivers 1978/79, 1986/87, 1988/89, 1998/99 et 2002/03
 Graph 13 - Cold intensity at Oulu (cumulative sum of degree-days below 0°C) and maximum ice extent for winters 1978/79, 1986/87, 1988/89, 1998/99 and 2002/03

Ainsi, la somme des jours-degrés négatifs donne une idée de l'importance de la prise en glace et de la sévérité de la saison (Haapala et Leppäranta, 1996, 630) de même que « l'ampleur de la surface englacée reflète la somme des températures négatives considérées

comme un critère de la sévérité des hivers » (Roussel, 1987, 280). Le même auteur précise quelques lignes auparavant que « la glaciellisation peut être considérée comme un indicateur de la rigueur de l'hiver » (*ibid.*, 279)

5.2.2.1.3 – La sévérité de la prise en glace, indicateur de la sévérité de l'hiver

L'extension du couvert de glace donne une indication sur la sévérité de l'hiver. Il semble ainsi opportun de classer²⁴ les hivers en fonction de l'extension maximale de la surface englacée. La superficie maximale englacée en Baltique atteint 420 000 km² et la minimale 49 000 km² entre 1720 et 2008. Les hivers modérés, moyens et sévères occupent de façon égale 33,33% de la surface englacée (extension minimale ôtée de l'extension maximale). Nous avons classifié les hivers modérés et sévères en sous-catégorie : en extrêmement modérés (11%) et modérés (22%), et sévères (22%) et extrêmement sévères (11%). Dans le cas d'hivers extrêmement modérés, seules, la Baie de Botnie, certaines parties du golfe de Finlande et de la Mer de Botnie ainsi que les eaux peu profondes du Golfe de Riga sont recouvertes de glace, l'étendue maximale de la banquise atteignant à peu près 12% de la surface totale de la Baltique. Pendant les hivers qualifiés de moyens, les eaux des trois golfes et celles des côtes de la Baltique Propre gèlent. Et dans le cas d'hivers extrêmement sévères, la banquise recouvre la quasi-totalité de la Mer Baltique. Le tableau 14 classifie les hivers en fonction de l'extension du couvert de glace et indique le nombre et le pourcentage d'hiver par type.

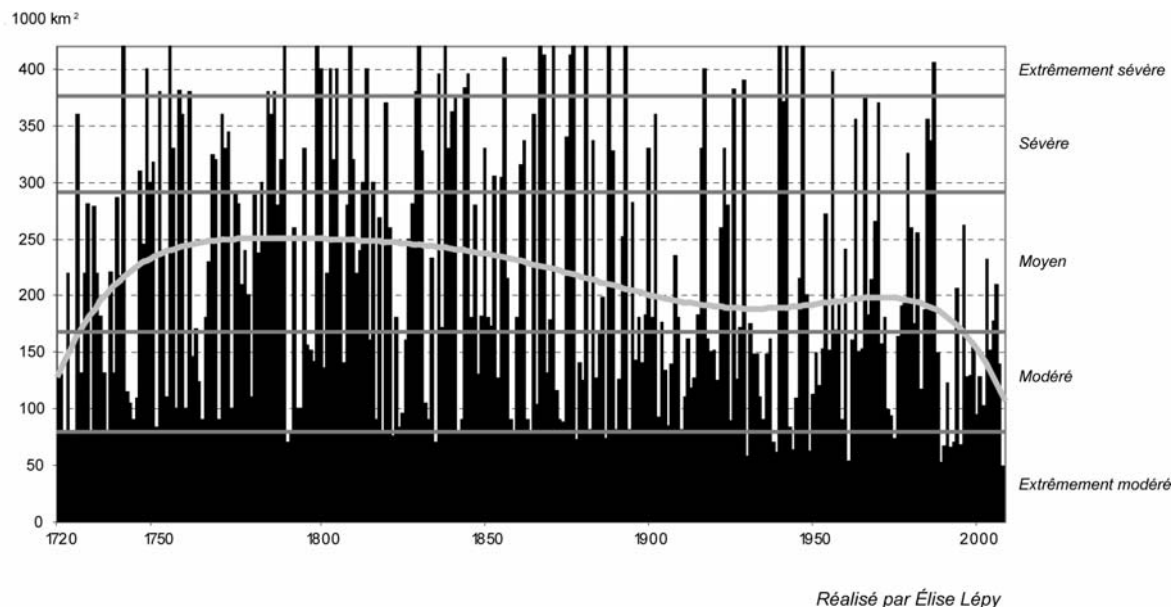
Type d'hiver	Limite inférieure (km ²)	Limite supérieure (km ²)	Nombre d'hivers	Pourcentage d'hiver (%)
<i>Minimum</i>		49 000		
<i>Extrêmement modéré</i>	49 000	93 000	50	17, 30
<i>Modéré</i>	93 000	175 000	83	28, 72
<i>Moyen</i>	175 000	297 000	74	25, 61
<i>Sévère</i>	297 000	379 000	44	15, 22
<i>Extrêmement sévère</i>	379 000	420 000	38	13, 15
			289	100

Élise Lépy

Tableau 14 - Classification des hivers par rapport à l'extension maximale du couvert de glace
Table 14 – Winter classification regarding the maximum ice extent

²⁴ Le principe de classement repose sur trois catégories aux effectifs égaux (33%) qui elles-mêmes sont composées de sous-catégories aux effectifs égaux.

Il résulte de ce tableau que presque la moitié des hivers (46 %) sont qualifiés de modérés voire extrêmement modérés et que moins d'un tiers (28,37%) ont été sévères voire extrêmement sévères. La répartition temporelle de l'extension maximale de la glace précédemment présentée, introduit ici les types d'hiver (graphique 14).



Graphique 14 – Extension maximale de la surface englacée en fonction des types d'hiver en Mer Baltique pour la période 1720-2008

Graph 14 – Maximum ice extent for different types of winter in the Baltic Sea from 1720 to 2008

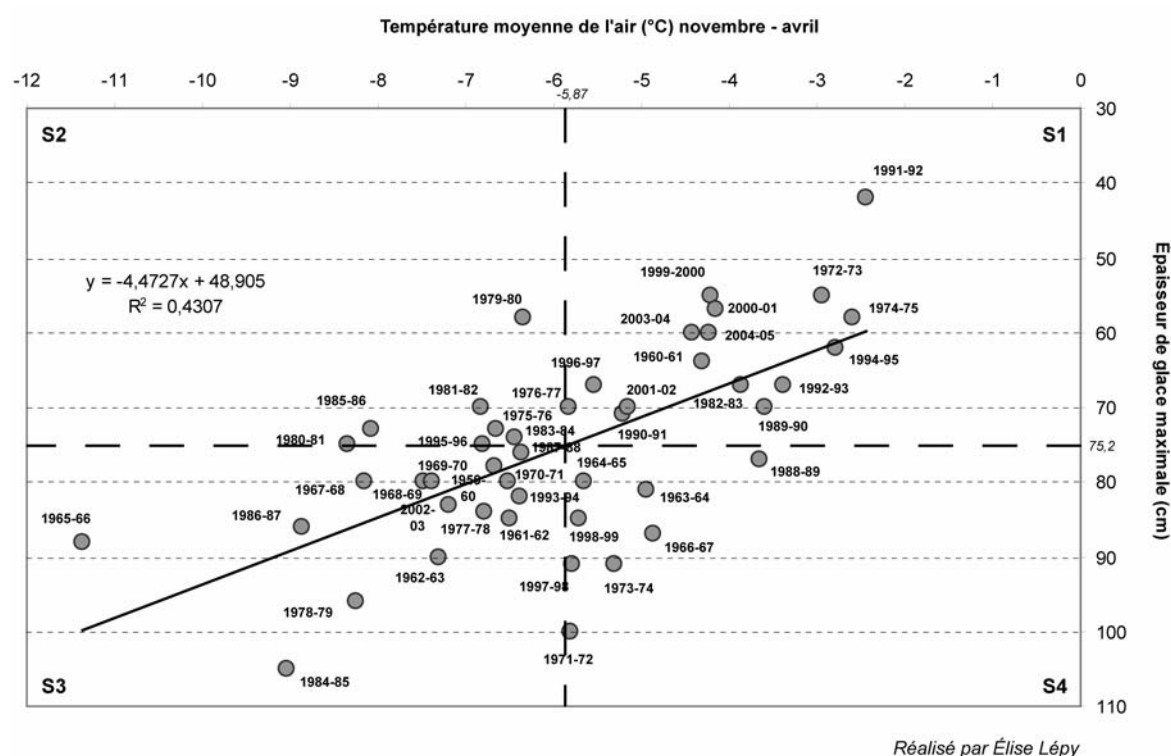
La fin du XVIII^{ème} siècle et le début du XIX^{ème} siècle ont connu de manière générale les hivers les plus sévères. En effet, parmi les seize hivers qui ont vu la Mer Baltique prendre en glace sur 420 000 km², treize d'entre eux appartiennent à ces deux siècles (le maximum le plus récent date de l'hiver 1946-47). Il y a effectivement une moindre fréquence des phénomènes moyens à extrêmement sévères pendant la période couvrant les deux derniers tiers du XX^{ème} siècle. Durant les vingt dernières années, tous les hivers ont été moyens, modérés voire extrêmement modérés - les deux derniers minimum ont été enregistrés en 1989 avec 52 000 km² et 2008 avec 49 000 km². En revanche l'hiver 1986/87 a été extrêmement sévère comme nous l'avons démontré auparavant. La classification de l'étendue maximale de la couverture glacielle par hiver depuis 1720 figure en annexe 9.

Il n'est pas surprenant qu'une forte corrélation existe entre les températures de l'air et l'extension des glaces marines de la Baltique. B. Tinz (*in* Omstedt et Chen, 2001, 4495) signale que 84,6 % de la variabilité de l'extension des glaces marines peuvent être attribuées aux variations de la température de l'air pendant l'hiver sur la Mer Baltique.

Les corrélations obtenues entre l'extension de la glace en Mer Baltique et les températures hivernales à Oulu et à Riga semblent satisfaisantes. Néanmoins, un affinement spatial de l'étude des phénomènes donne davantage d'information sur un espace plus restreint. Pour cela, deux indicateurs de la sévérité de l'hiver vont être étudiés ci-dessous : l'épaisseur de glace et la durée du cycle glaciaire dans différentes stations côtières du Golfe de Botnie.

5.2.2.2 – Corrélation entre la température et l'épaisseur de glace

Même si l'épaisseur de la glace dépend d'autres facteurs tels que le taux de salinité, les courants marins, le vent, elle reste un bon indicateur de la sévérité de l'hiver. De manière générale, les températures de fin d'hiver sont plus favorables à la glaciellisation de la mer : l'étendue et l'épaisseur maximales du couvert de glace sont souvent atteintes au mois de mars. Le graphique de dispersion (graphique 15) montre l'intensité de la relation entre les températures moyennes de l'air enregistrées entre novembre et avril à la station météorologique d'Oulu et l'épaisseur de glace maximale mesurée à Virpiniemi pour les hivers 1959/60 à 2004/05.



Graphique 15 – Corrélation entre la température moyenne hivernale de l'air (station météorologique d'Oulu) et l'épaisseur maximale de la glace (Virpiniemi) 1959/60 – 2004/05

Graph 15 – Correlation between average winter temperature (Oulu) and maximum ice thickness (Virpiniemi) from 1959/60 to 2004/05

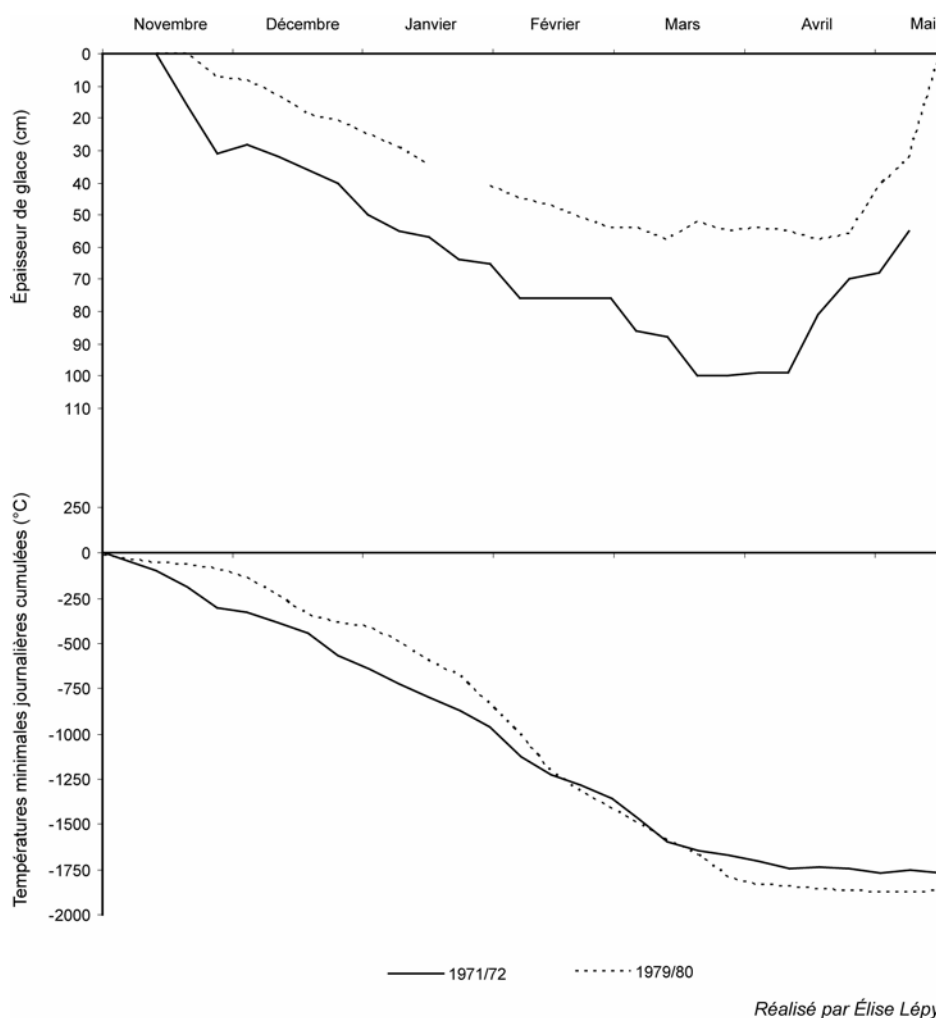
La corrélation entre les températures moyennes de l'air et l'épaisseur maximale de la glace est évaluée à 0,66. La dispersion du nuage de points va dans le sens de cette corrélation plutôt moyenne. Les droites représentant les moyennes des deux variables (-5,87°C pour la température de l'air et 75,2 cm pour l'épaisseur de glace) partagent le graphique en quatre sections :

- S1 correspond aux années à hivers doux pendant lesquels l'épaisseur du couvert de glace est restée faible,
- S2 regroupe les années à hivers froids pendant lesquels l'épaisseur du couvert de glace est restée faible,
- S3 regroupe les années à hivers froids pendant lesquels l'épaisseur du couvert de glace a été supérieure à la moyenne,
- et S4 regroupe les années à hivers doux pendant lesquels l'épaisseur du couvert de glace a été supérieure à la moyenne.

Les sections S2 et S4 regroupent peu de cas contrairement aux sections S1 et S3 dont la relation entre les deux variables est logique. De ce fait, il semble opportun d'étudier le cas des sections S2 et S4 pour comprendre leur signification. À titre d'exemple, l'hiver 1979/80 a connu des températures hivernales plus froides que la moyenne (-6,35°C en moyenne) et une épaisseur de glace maximale relativement faible de 58 cm. En revanche, l'hiver 1971/72 a été moyen d'un point de vue thermique (-5,80°C) mais l'épaisseur de glace maximale mesurée (100 cm) a été l'une des plus importantes de ces 45 dernières années. Si la seule température moyenne hivernale ne peut expliquer logiquement le comportement du couvert de glace, il semble alors intéressant d'observer l'évolution de la température à un pas de temps journalier. Les températures minimales enregistrées au cours d'une journée sont, en effet, celles qui influencent la prise en glace de l'eau. Le graphique 16 met en relation l'évolution de l'épaisseur de glace mesurée à Virpiniemi et les valeurs cumulées des températures minimales journalières à la station météorologique d'Oulu du début novembre à la mi-mai.

Il résulte de ces courbes une précocité de l'embâcle des eaux marines en 1971 ainsi qu'une épaisseur de glace plus importante. Le cumul des températures minimales journalières explique cette précocité et révèle ainsi que l'année 1971/72 a connu des températures automnales plus froides qu'en 1979/80. Au cœur de l'hiver, la situation s'est inversée : l'hiver 1979/80 a cumulé de nombreuses journées très froides. Ces températures hivernales très froides de 1980 ont nettement fait épaissir la couche glacielle. Cependant la couverture de glace de 1980 n'a pu atteindre l'épaisseur de celle de 1972 qui a continué à augmenter malgré des températures hivernales moyennes. La courbe du cumul des températures minimales confirme bien que l'hiver 1979/80 a été plus froid en moyenne que l'hiver 1971/72 mais sur une courte durée, ce qui explique une couverture de glace moins importante qu'en 1972.

De manière générale, Corinna Schrum et Jan Backhaus (1999, 536) ont calculé que, dans le Sud du Golfe de Botnie, l'épaisseur de glace peut doubler quand la température s'abaisse de 2°C.

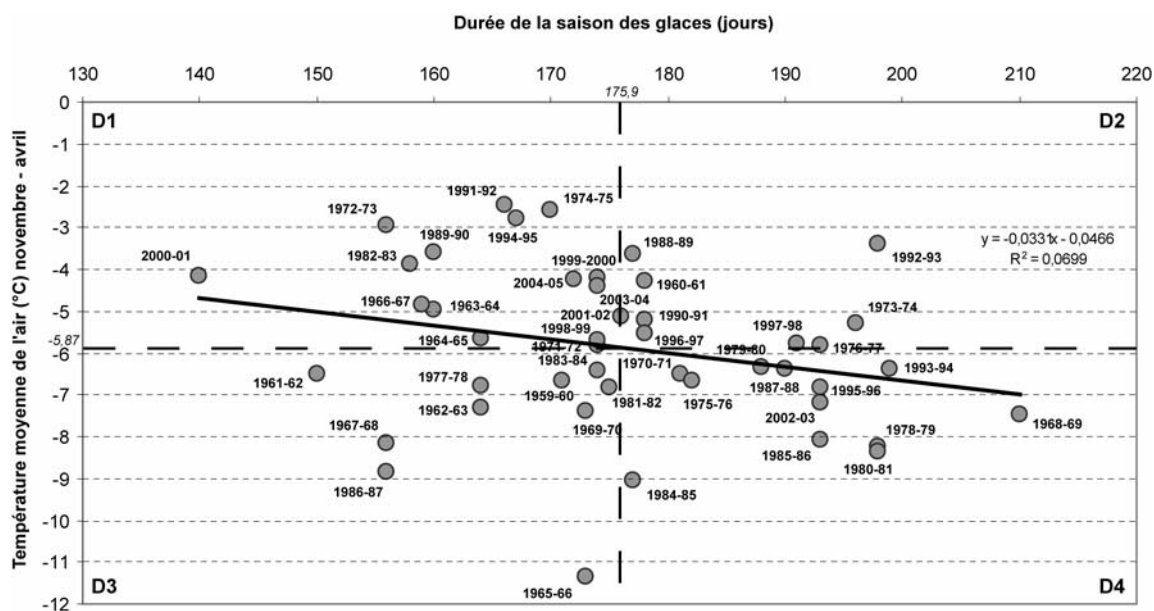


Graphique 16 – Évolution de l'épaisseur de glace à Virpiniemi et des températures minimales journalières cumulées à la station météorologique d'Oulu en 1971/72 et 1979/80

Graph 16 – Ice thickness evolution at Virpiniemi and minimum daily temperatures cumulated at Oulu in 1971/72 and 1979/80

5.2.2.3 – Corrélation entre la température et la durée du cycle glaciaire

Autant l'épaisseur de glace est un bon indicateur de la sévérité d'un hiver, la saison des glaces, pour sa part, est un indicateur de la longévité de l'hiver. La relation entre les températures moyennes hivernales à la station météorologique d'Oulu et la durée du cycle glaciaire au large de Virpiniemi est présentée sur le graphique de dispersion 17 pour les hivers 1959/60 à 2004/05.



Réalisé par Élise Lépy

Graphique 17 – Corrélation entre la température moyenne hivernale de l'air (station météorologique d'Oulu) et la durée du cycle glaciai (Virpiniemi) de 1959/60 à 2004/05

Graph 17 – Correlation between average winter temperature (Oulu) and ice season length (Virpiniemi) from 1959/60 to 2004/05

La corrélation entre la température moyenne de l'air enregistrée de novembre à avril et la durée de la saison des glaces est faible, de 0,26. Le graphique présente une distribution dispersée qui confirme bien la faible intensité de la relation entre les deux variables. La moyenne de la durée du cycle glaciaire est évaluée à près de 176 jours et celle de la température moyenne hivernale est toujours de -5,87°C. Les années de part et d'autre de ces moyennes sont regroupées en quatre secteurs :

- D1 regroupe les années à hivers doux pendant lesquels le cycle glaciaire a été plus court que la moyenne,
- D2 concerne les années à hivers doux mais qui ont connu une saison des glaces longue,
- D3 regroupe les années à hivers froids pendant lesquels le cycle glaciaire a été relativement court,
- enfin D4 concerne les années à hivers froids ayant connu une saison des glaces longue.

Face à l'importance logique des secteurs D1 et D4, les secteurs D2 et D3 regroupent moins de 40% des hivers. Ces deux secteurs ont pour particularité de présenter des hivers exceptionnels qui, d'un point de vue graphique, sont éloignés de la droite de régression. À titre d'exemple, il semble intéressant d'établir une comparaison entre les hivers 1986-87, hiver froid à saison des glaces courtes, et 1992-93, hiver relativement doux à saison des glaces de longue durée.

La saison des glaces de l'hiver 1992-93 a été relativement longue, d'une durée de 198 jours alors que la température moyenne hivernale enregistrée n'était que de $-3,38^{\circ}\text{C}$. Au contraire le cycle glaciaire n'a duré que 156 jours en 1986-87 alors que l'hiver a été relativement froid de $-8,87^{\circ}\text{C}$. Dans les deux cas, la corrélation entre la durée du cycle glaciaire et la température moyenne hivernale n'est pas évidente. Il paraît alors opportun d'observer le comportement des températures minimales hivernales tout au long des deux hivers.

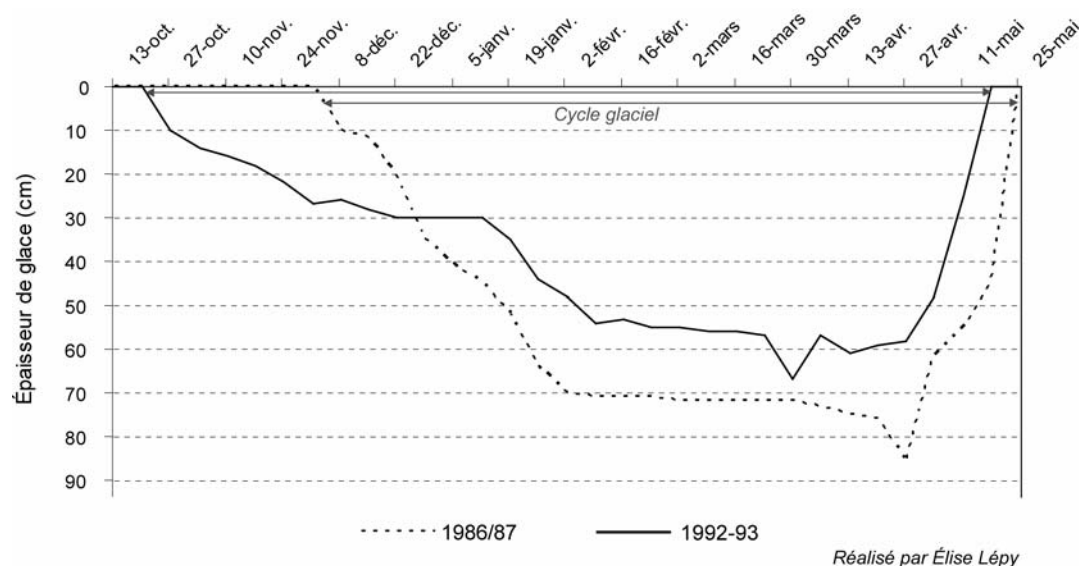
Le tableau 15 présente la somme des températures minimales mensuelles en 1986-87 et 1992-93. Logiquement, pour l'année 1986-87 qui a connu un hiver froid, la somme des températures inférieures à 0°C est négativement plus importante que pour l'année 1992-93, et ceci réparti sur un nombre de jours équivalent. Cependant, il est aisé de remarquer que la somme des températures négatives varie peu d'octobre à avril en 1992-93 alors qu'elle a été décroissante jusqu'en janvier puis croissante jusqu'en mai en 1986-87. De ce fait, l'évolution des températures minimales a une grande influence sur la formation et la fonte des glaces marines. Le graphique 18 montre bien le comportement des glaces marines à Virpiniemi pour les deux hivers concernés. Les deux courbes confirment bien une précocité de l'embâcle en 1992 par rapport à l'automne 1986. De plus, les très basses températures minimales enregistrées en 1987 s'expriment par une épaisseur de glace importante. Ainsi, seule la température moyenne n'explique pas toujours un phénomène, mais son évolution à un pas de temps journaliers indique mieux les raisons de la durée d'un cycle glaciaire.

		Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Total
1986-87	Somme des t_{\min} mensuelles	-18,2	-10,9	-39,1	-549,2	-759,9	-469	-404,7	-131,8	-16,6	-2399,4
	Nombre de jours avec $t_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$	7	6	14	29	31	28	29	28	8	180
1992-93	Somme des t_{\min} mensuelles		-232,8	-292,6	-102,3	-276,1	-257,5	-210,6	-114,3	-1	-1487,2
	Nombre de jours avec $t_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$		24	29	19	30	26	28	21	2	179

Élise Lépy

Tableau 15 – Somme des températures minimales mensuelles et nombre de jours avec des températures minimales négatives pour les hivers 1986/87 et 1992/93 à la station d'Oulu

Table 15 – Sum of minimum monthly temperatures and number of days with minimum negative temperatures for winters 1986/87 and 1992/93 at Oulu



Graphique 18 – Évolution de l'épaisseur de glace à Virpiniemi pour les hivers 1986/87 et 1992/93
 Graph 18 – Ice thickness evolution at Virpiniemi for winters 1986/87 and 1992/93

5.2.2.4 – Conclusion partielle

La température est un élément fondamental dans la formation de la banquise et dans sa fonte et pour cela I. Roussel (1987, 279) est convaincue que « *la glaciellisation de la mer dépend uniquement des conditions thermiques de l'hiver en cours* ». Il faut toutefois relativiser ces propos et replacer les phénomènes cryomarins dans leur contexte géographique. En effet, si la température détient un rôle fondamental et primordial à la prise en glace des eaux de la Baltique, d'autres facteurs météorologiques comme les précipitations neigeuses et leur rôle superficiel isolant, et météomarins tels les vents et courants ainsi que la salinité sont également à prendre en compte.

5.2.3 – Le rôle isolant de la neige

À l'arrivée des basses températures, les précipitations sous forme solide se font plus nombreuses bien qu'elles ne représentent que 5% des précipitations totales (Kuusisto, 2005b, 159). La neige devient alors un facteur environnemental important en Fennoscandie et affecte les saisons hivernales et printanières de deux manières : d'abord, du fait de son fort albedo, la neige absorbe moins les radiations solaires ; ensuite la fonte printanière agit comme un réservoir de chaleur gardant la température au sol proche de 0°C malgré les flux radiatifs importants (*ibid.*).

En plein hiver quand la banquise est formée, l'eau libre située au-dessous de la couverture de glace est plus chaude que l'air. La chaleur passe alors de l'eau à l'air par conduction à travers la glace. (Ces problèmes de conductivité thermique seront détaillés

davantage dans le sous-chapitre suivant). Mais quand la neige tombe, une couverture neigeuse se forme sur la banquise et ralentit le flux de chaleur provenant de l'eau. La neige constitue alors un isolant thermique important (Kuusisto, 2005b, 171 ; French, 2007, 109). Cependant l'efficacité de la neige en tant qu'isolant thermique dépend de son degré de compaction : plus une couche de neige est légère et fraîchement tombée, plus la neige constitue un bon isolant ; au contraire plus elle est compacte et dure, moins son pouvoir isolant agit (Environnement Canada).

Aux hautes latitudes, la neige et la glace ont une forte réflectivité. Ainsi, une grande partie du rayonnement solaire est renvoyée dans l'atmosphère en raison du fort albedo (Escourrou, 1983, 55). Les variations saisonnières de l'albedo de surface sont très importantes dans les régions de hautes latitudes où les hivers sont froids et pourvus de neige et de glace et les étés plus doux. C'est à la fin de l'hiver et à l'arrivée du printemps, quand la fonte débute, que l'albedo de surface est le plus variable (Keevallik et Tooming, 1996, 727). Sur la glace de mer, la variabilité de l'albedo de surface dépend de deux éléments : l'épaisseur de la couche glacielle et la présence d'une couverture neigeuse. L'albedo de surface le plus faible est celui de la glace fondante qui décroît en même temps que l'épaisseur de la banquise. En revanche, la limite supérieure de l'albedo est donnée par la présence de neige fraîche.

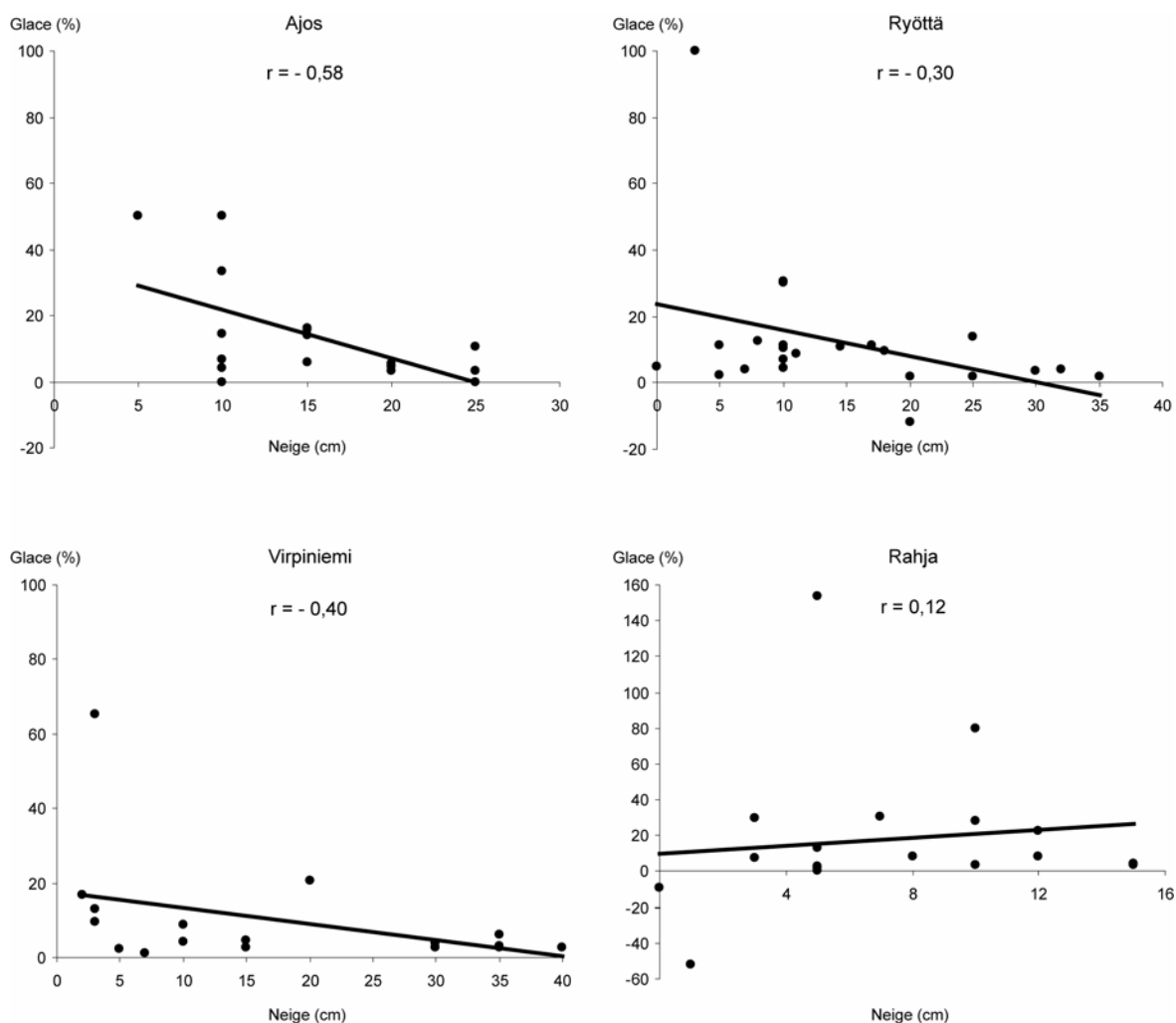
La glace de mer a déjà un fort albedo mais si elle est recouverte de neige, l'albedo de cette neige nouvelle qui est sèche peut atteindre 0,9, alors que l'albedo de la glace nue en période de fonte n'est que de 0,4 voire moins si la couche glacielle devient vraiment fine. Vesa Laine et Martti Heikinheimo (1996) ont estimé la valeur de l'albedo de surface des hautes latitudes à partir de données NOAA AVHRR. Il en résulte qu'au début du mois d'avril, l'albedo de la partie Nord glacée du Golfe de Botnie est en général supérieure à 0,6 mais retombe à 0,5 au printemps (*ibid.*, 434). L'épaisseur de cette couche de neige a une incidence considérable sur l'albedo de surface. Thomas Grenfell et Donald Perovich (2004, 10) estiment qu'une couverture de neige dont l'épaisseur est supérieure à 10 centimètres, a un albedo proche de 0,80, alors que pour une couverture plus fine, l'albedo commence à décroître. Ces mêmes auteurs (2004, 10-11) ont évalué l'épaisseur de neige nécessaire à l'atténuation totale des radiations solaires en fonction de l'âge de la neige : il faut ainsi environ 6 à 7 centimètres de neige fraîche avec des grains de 0,1 millimètres, ou 10 à 12 centimètres de neige vieillie avec des grains de 0,5 - 1 millimètres.

D'autre part, l'albedo de surface affecte la croissance et la fonte de la glace de mer et de sa couverture neigeuse. Comme la neige agit comme un isolant entre l'océan et l'atmosphère, la croissance de la banquise s'en trouve affectée. De plus, Roberta Pirazzini *et al.* (2006, 12-13) précisent que la fonte occasionne une pénétration plus profonde des radiations solaires et que l'albedo de surface est fortement affecté par l'assombrissement de la surface de la banquise, ce qui accélère davantage la fonte. Au contraire,

l'augmentation de l'albedo génère une baisse des température de surface ce qui favorise un fort albédo (Pirazzini *et al.*, 2006, 7). En effet, Gisèle Escourrou (1983, 56) a estimé que pour faire fondre un centimètre de glace de mer par jour, un apport énergétique de 100 W.m⁻² est nécessaire. Ainsi le fort albédo et la consommation importante d'énergie pour le réchauffement et la fusion de la neige et de la glace expliquent la persistance du froid dans les régions de hautes latitudes.

Toutefois, les changements de surface neige / glace sont en conséquence associés à un fort mécanisme de rétroaction : une faible réduction de l'albédo peut entraîner une large augmentation de l'absorption des radiations solaires (Vihma et Haapala, 2003, 32). Pour la Mer Baltique, le changement de l'albédo durant la période de fonte est beaucoup plus prononcé et l'albédo décroît jusqu'à de très faibles valeurs (Pirazzini *et al.*, 2006, 11). Ceci est dû aux masses d'air chaudes qui causent une fonte importante jusqu'à la disparition totale de la glace.

Les graphiques 19 définissent l'intensité de la relation épaisseur de la glace et profondeur de neige. Pour cela, le taux de croissance du couvert de glace a été calculé en relation avec la profondeur de neige présente sur ce même couvert. Prenons quatre stations du Golfe de Botnie dont trois d'entre elles (Ryöttä, Virpiniemi et Rahja) ont déjà été présentées au cours du chapitre précédent. Pendant l'hiver 2002/2003, trois d'entre elles affichaient une droite de régression décroissante confirmant le rôle isolant de la neige : plus la profondeur de neige est importante, plus le taux de croissance du couvert de glace est faible. Toutefois, les coefficients de corrélation calculés restent moyens, de - 0,30 (Ryöttä) à - 0,58 (Ajos). De manière générale, la relation est logique mais pas très intense. Le cas de Rahja échappe à cette logique puisque d'une part, la droite de régression est positive et d'autre part le coefficient de corrélation entre les deux variables est proche de 0. La fonte temporaire et courte de la banquise sur plus de quatorze centimètres survenue à la fin du mois de décembre explique des taux de croissance extrêmes, négatifs puis positifs, de la couche de glace (le graphique 5 illustre bien cette décroissance ponctuelle).



Réalisé par Élise Lépy

Graphiques 19 – Corrélation entre la hauteur (cm) de neige sur le couvert de glace et le taux de croissance de la glace (%) pendant l'hiver 2002/03

Graphs 19 – Correlation between snow depth (cm) on ice cover and ice growth rate (%) for the winter 2002/03

5.2.4 – Les facteurs météomarins

5.2.4.1 – L'effet du vent et des courants marins sur la banquise

Comme on l'a décrit précédemment, les conditions de glace sont principalement déterminées par les fluctuations de la température de l'air. Cependant, ces fluctuations thermiques combinées à celles du vent peuvent améliorer ou dégrader l'état de la banquise. Ainsi, l'une des caractéristiques des glaces de mer de la Baltique est leur mobilité dynamique en réponse au forçage atmosphérique et océanique. En effet, le couvert de glace est en mouvement permanent, soumis au gré des vents de surface et des courants marins. La banquise marine se présente ainsi en deux types : la glace de dérive (*drift ice*) sujette à l'action du vent et des courants, et la banquise côtière (*fast ice*) qui,

soudée à la côte, ne bouge pas (WMO, 2006, 4). La glace de dérive est ainsi soumise à deux forces principales : la poussée du vent et celle de l'eau.

Le déplacement de la glace de dérive dû au vent ne varie pas seulement avec la vitesse du vent mais aussi avec la concentration de la glace. Le vent a plus d'effet sur la banquise lâche (jusqu'à 6/10) que sur la banquise serrée voire très serrée (de 7 à 9/10) où l'espace libre de glace est très limité. Il est ainsi plus difficile de voir en mouvement une banquise consolidée (*ibid.*). En l'absence d'autres forces, une banquise de concentration moyenne (entre 6 et 8/10) se déplace à une vitesse équivalant 2% de celle du vent (*ibid.* ; Environnement Canada). L'expérience menée par Juha Uotila (2001) en plein cœur du Golfe de Botnie pendant l'hiver 1998, démontre aussi le rôle significatif du vent dans la dynamique des glaces de mer. Son dispositif de bouées a témoigné de l'intensité de la relation linéaire vent / dérive de glace là où la concentration de glace était faible. Il a également démontré le rôle combiné des courants marins et du vent dans le centre du bassin sud de la Baie de Botnie (Uotila, 2001, 126).

Il est d'ailleurs parfois difficile de différencier entre les vents et les courants de surface comme cause du déplacement des glaces ou du ralentissement de la formation de la banquise. En général, les vents sont responsables des dérives de glace sur un court terme contrairement aux courants marins dont l'action peut durer à plus long terme. En Mer Baltique, les courants marins pouvant déplacer de la glace de dérive sont au nombre de deux : les courants permanents et les courants temporaires engendrés par le vent (comme les marées sont faibles, les courants de marées n'ont pas d'action significative sur le mouvement de la banquise). La vitesse des courants marins diminue avec la profondeur. De ce fait, plus la banquise est épaisse, moins elle se déplace rapidement (Uotila, 2001, 126).

La figure 9 présente l'état glaciologique de la Mer Baltique en janvier 2002. Les cinq cartes indiquent l'évolution de la formation de la banquise, des côtes vers le large et du Nord au Sud. Cependant, on peut observer un retrait vers le Nord et Nord-Est de la banquise entamé le 7 janvier. Ce phénomène s'explique par la fréquence des vents en provenance d'Ouest et de Sud-Ouest dans la région. Les stations météorologiques d'Oulu, d'Ulkokalla et de Valassaaret ont enregistré au cours du même mois des vents d'Ouest et Sud-Ouest majoritaires et contraires au sens de formation de la banquise. Ceci s'est traduit par la formation de crêtes de pression vers le 14 janvier, résultat de la poussée du vent.

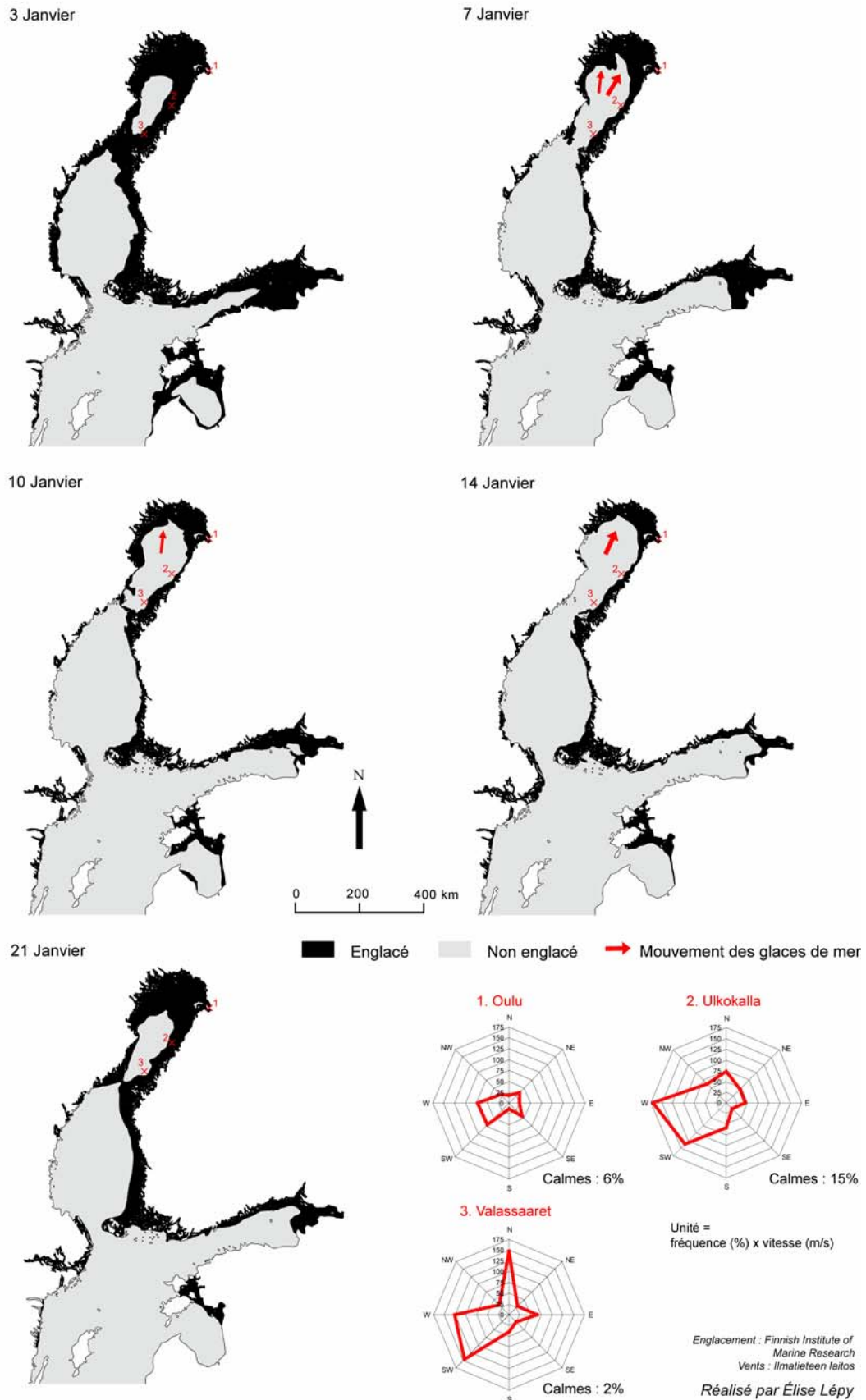


Figure 9 – État de l’englacement de la Mer Baltique en janvier 2002 et direction des vents dominants
Figure 9 – Ice growth state in the Baltic Sea in January 2002 and dominant wind direction

L'image satellitaire Envisat datée du 5 mars 2003 fournit une autre illustration des effets du vent sur la banquise dans le Golfe de Riga. Le vent de Sud-Est ayant traversé les basses terres, pousse le pack de glace vers le Nord-Ouest en le fracturant : un pack mobile se détache de la banquise côtière qui borde les côtes lettones et laisse la fracture s'agrandir au gré du vent. Au Nord-Ouest du golfe, le pack de glace marine en mouvement percute la banquise côtière formée le long des côtes de l'île Saaremaa et de l'Estonie. Les glaces marines du pack brisé se chevauchent (*rafted ice*) ou forment des monticules appelés hummocks.

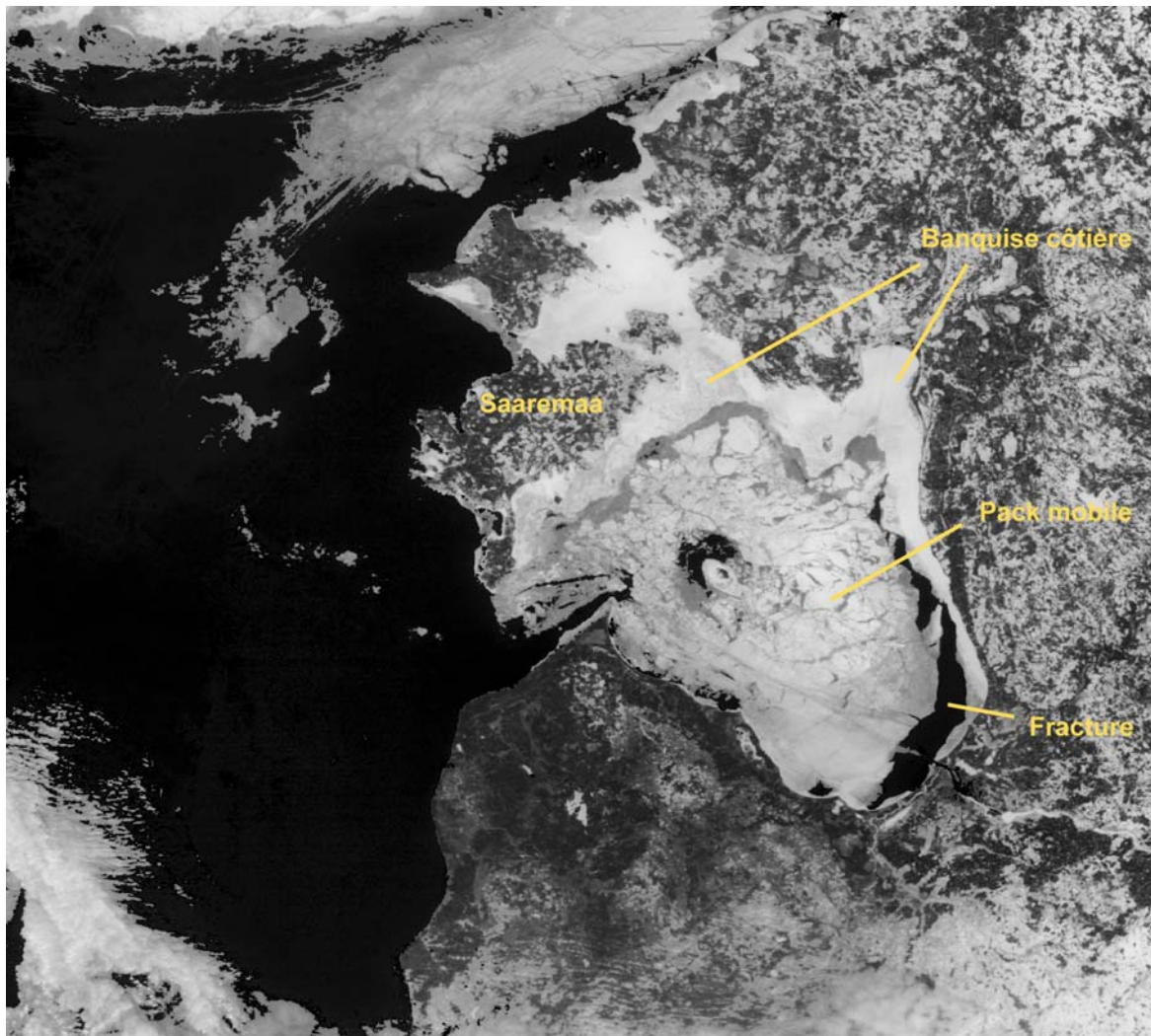


Image satellitaire 3 – La poussée d'un vent de Sud-Est sur la banquise du Golfe de Riga, le 5 mars 2003, image Envisat²⁵

Satellite image 3 – Action of wind from South-East on the ice pack of the Gulf of Riga in March 5th 2003, Envisat image

²⁵ Les images Envisat ont été traitées par le Département de Géophysiques de l'Université d'Helsinki dans le cadre du programme "Snow and ice in North Europe (ENVISAT-AO 455)"

En conclusion, le vent a pour effet d'influencer la température de l'eau de surface. En effet, un vent faible favorise le refroidissement de l'eau de surface et son englacement (Schrum et Backhaus, 1999, 538). Mais au contraire, il peut retarder la formation de la banquise via les courants marins et les remontées d'eau tiède souvent accompagnées par des vents d'Ouest et de Sud-Ouest (Roussel, 1987, 205). D'autre part, le mouvement de la glace de dérive induit par le vent et les courants marins a pour conséquence de rendre la glace plus compacte ou alors de la disperser. Ces effets sont d'une grande importance pour la navigation qui peut rapidement être entravée, par exemple, par l'occurrence de crêtes près des côtes et des entrées portuaires. Mais la présence de nombreux navires et phares permet de rapporter quotidiennement l'état des conditions hydroclimatiques en Mer Baltique, et de faire face au moindre changement météorologique et à ses conséquences sur l'état de la mer ou de la banquise.

5.2.4.2 – La salinité dans la glace de mer

Comme on l'a déjà évoqué en première partie, la Mer Baltique constitue l'un des plus grands bassins d'eau saumâtre du globe. En effet, la salinité de la Baltique est contrôlée par les apports d'eau salée venus de la Mer du Nord et ceux d'eau douce de son bassin-versant continental. Ainsi, la salinité de ses eaux marines varie de 13 ‰ dans la Baltique Propre à moins de 4 ‰ dans la Baie de Botnie (carte 7). De ce fait, à l'approche de l'hiver, la température de congélation de l'eau varie en fonction du degré de salinité : pour une salinité de 35 ‰, la température de -1,8 °C est requise. Dans les Golfes de Botnie et de Riga, les taux de salinité sont bien plus minimes et les propriétés de leurs eaux sont très proches de l'eau douce.

Qu'en est-il pour la Baie de Botnie ? La salinité des eaux marines de la Baie de Botnie est inférieure à 3 ‰ et dans les espaces les plus retirés vers le Nord, elle ne dépasse pas 1 ‰ (Gow *et al.*, 1992, 2). En période de prise en glace, la teneur en sel va certes diminuer mais demeure toutefois dans la glace de mer. Cette dernière est formée d'inclusion liquide de sels, de sels durs, de bulles d'air, d'impuretés et de fissures dans la glace pure. Le volume des inclusions liquides décroît en fonction de la diminution de la température quand l'eau de mer gèle et la concentration augmente (Tiuri *et al.*, 1978, 362). Il a été prouvé expérimentalement que la salinité de la glace nouvelle correspond souvent à un tiers puis une semaine après le début de la prise en glace à un quart de celle de l'eau de mer (*ibid.*, 363).

Anthony Gow *et al.* (1992) ont aussi mené une série de mesures pendant l'hiver 1988 dans le Golfe de Botnie. Ils ont choisi trois sites de mesures (tableau 16) aux conditions cryomarines différentes : le premier était localisé près d'Umeå sur la banquise

côtière, le second plus au large sur de la glace en dérive et le dernier près de l'embouchure de la Tornionjoki, avec pour chacun des caractéristiques hydrologiques différentes. Il en ressort que sur la banquise côtière, le taux de salinité de l'eau sous-jacente à la banquise est compris entre 3,7 et 3,9 ‰ et que les températures de congélation sont de l'ordre de -0,18 à -0,21 °C. En surface, la température de la glace est proche de -4,6 °C, et sa salinité inférieure à 1 ‰ (Gow *et al.*, 1992, 4-5). Les auteurs ont ainsi montré à travers des diagrammes de structure verticale de la banquise que plus la couche glacielle était épaisse plus le taux de salinité diminuait en profondeur. Ce profil de salinité est similaire à celui des sites localisés sur la glace en dérive au large d'Umeå. Ces sites enregistrent des taux de salinité des eaux sous-jacentes à la banquise qui varient de 3,6 à 4,1 ‰. Grâce aux dernières mesures menées près de Tornio, il a été possible d'observer des taux de salinité de la glace – de 0,06 à 0,77 ‰ – supérieurs à ceux contenus dans l'eau de mer sous-jacente – de 0,035 à 0,043 ‰. Les panages d'eau douce du fleuve Tornionjoki sont évidemment à l'origine de ce déséquilibre (Palosuo, 1961). Ainsi à Kuusiluoto, dans le même secteur, E. Palosuo avait remarqué que l'eau de surface était constituée principalement d'eau douce au début de la prise en glace des eaux marines et que, par conséquent, le taux de salinité de la glace faible favorisait davantage le gel des eaux marines (Palosuo, 1953, 62).

Sites	Date	Coordonnées géographiques	Épaisseur de glace (cm)	Épaisseur de neige (cm)	Salinité (‰) de la glace	Salinité (‰) de l'eau
Banquise côtière	3 Mars	63°47,8' N 21°00,8' E	40 - 45	5	0,79 - 1,07	3,8 - 3,9
	5 Mars	63°48,0' N 20°59,0' E	41 - 43	6 - 8	0,76 - 0,83	3,9
	7 Mars	63°47,5' N 21°49,3' E	46	8 - 10	0,78	3,7
	8 Mars	63°47,8' N 21°00,8' E	11	0 - 1	0,99	
Glace en dérive	8 Mars	63°49,2' N 21°10,2' E	36	0 - 15	0,58 - 0,81	3,7
	10 Mars	63°46,5' N 21°31,7' E	29	1 - 5	0,66	3,6
	10 Mars	63°35,5' N 21°08,4' E	36 - 37	1 - 4	0,59	4,1
Près de Tornio	15 Mars	65°44,7' N 24°13,5' E	69	38	0,06	0,035
	15 Mars	65°39,3' N 24°14,0' E	57	38	0,12	0,038
	15 Mars	65°40,3' N 24°13,7' E	76	25 - 52	0,77	0,043

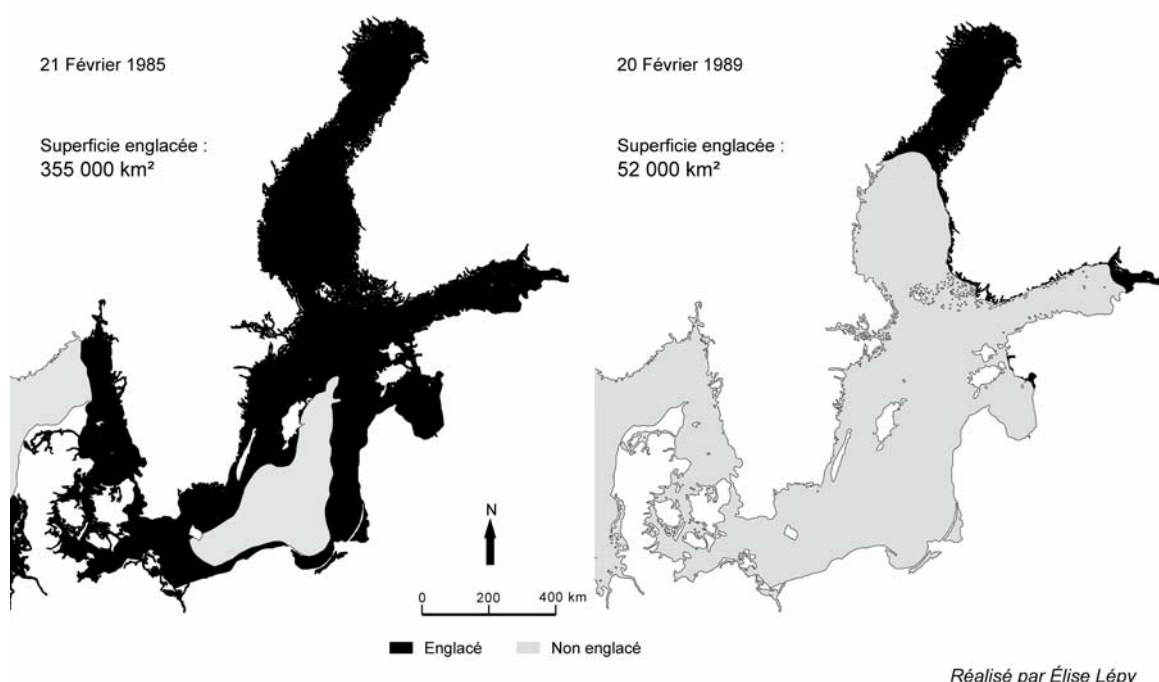
Tableau 16 – Salinité de la glace de mer dans la Baie de Botnie en 1988, d'après les résultats de Gow *et al.*, 1992

Table 16 – Marine ice salinity in the Bay of Bothnia in 1988, from Gow and al. results, 1992

Comme on l’a déjà souligné, la Mer Baltique est largement influencée par les apports d’eau douce déversés par les cours d’eau (Granskog *et al.*, 2006, 146). La Baie de Botnie reçoit un volume d’eau fraîche considérable en regard de la taille de son bassin versant (cf. chapitre précédent). Il est donc clair que plus le taux de salinité est bas, plus la prise en glace des eaux marines est aisée.

5.2.5 – Particularités des hivers sévères ou extrêmement modérés : le cas des hivers 1985 et 1989

Les hivers sévères et extrêmement modérés présentent, a priori, des caractéristiques glacielles et climatiques contraires. À titre d’exemple, il semble intéressant de prendre le cas des hivers 1985 et 1989 dont le premier a connu la Mer Baltique englacée sur plus de 355 000 km² alors que le second n’a vu que les eaux du Nord du Golfe de Botnie et de l’embouchure de la Neva prendre en glace, soit une superficie englacée de 52 000 km² (cartes 21). La question qui se pose alors est de savoir quels sont les facteurs responsables de deux situations extrêmes aussi opposées.



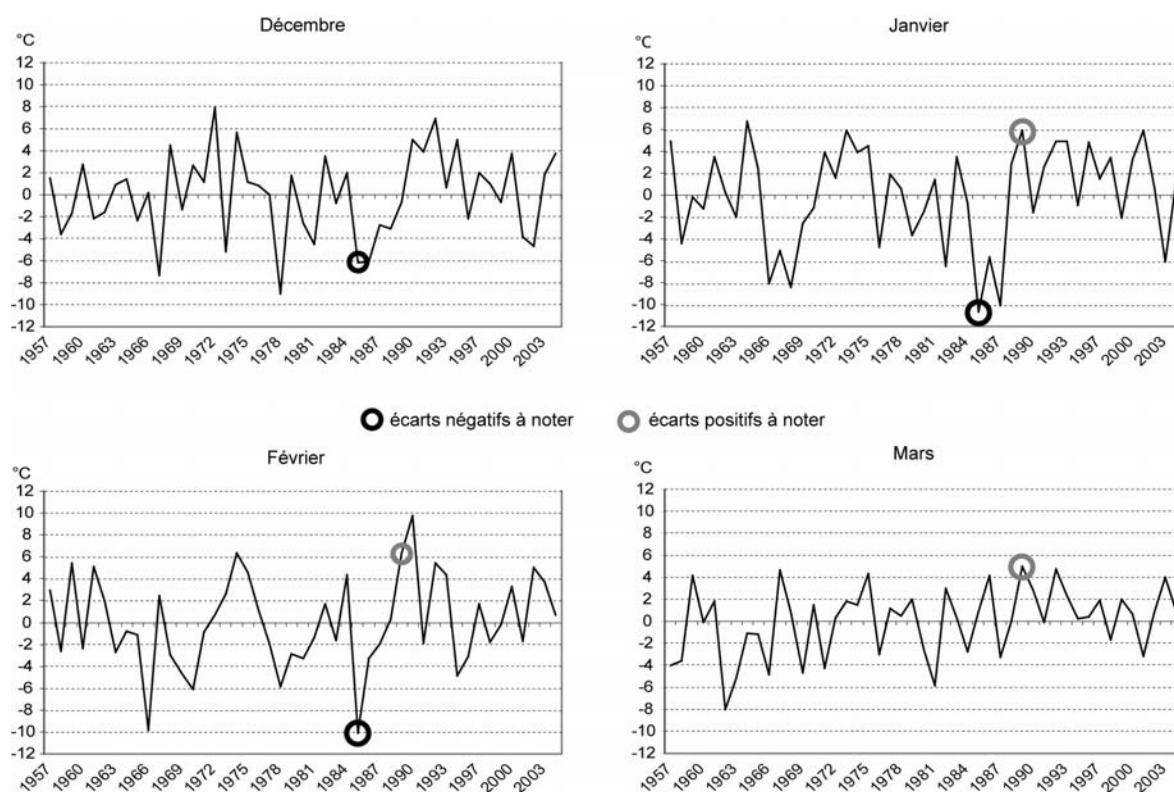
Cartes 21 – Maximum d’englacement en 1985 et 1989
 Map 21 – Maximim ice extent in 1985 and 1989

Les conditions thermiques hivernales reflètent bien les caractéristiques extrêmes de ces deux hivers. D’un côté, l’hiver 1985 a été l’un des plus froids de la seconde moitié du XX^{ème} siècle. Les anomalies thermiques en décembre mais surtout en janvier et février

à Oulu le confirment. De l'autre côté, les mois de janvier, février et mars de l'année 1989 ont fait partie des plus chauds depuis 1957 (graphiques 20).

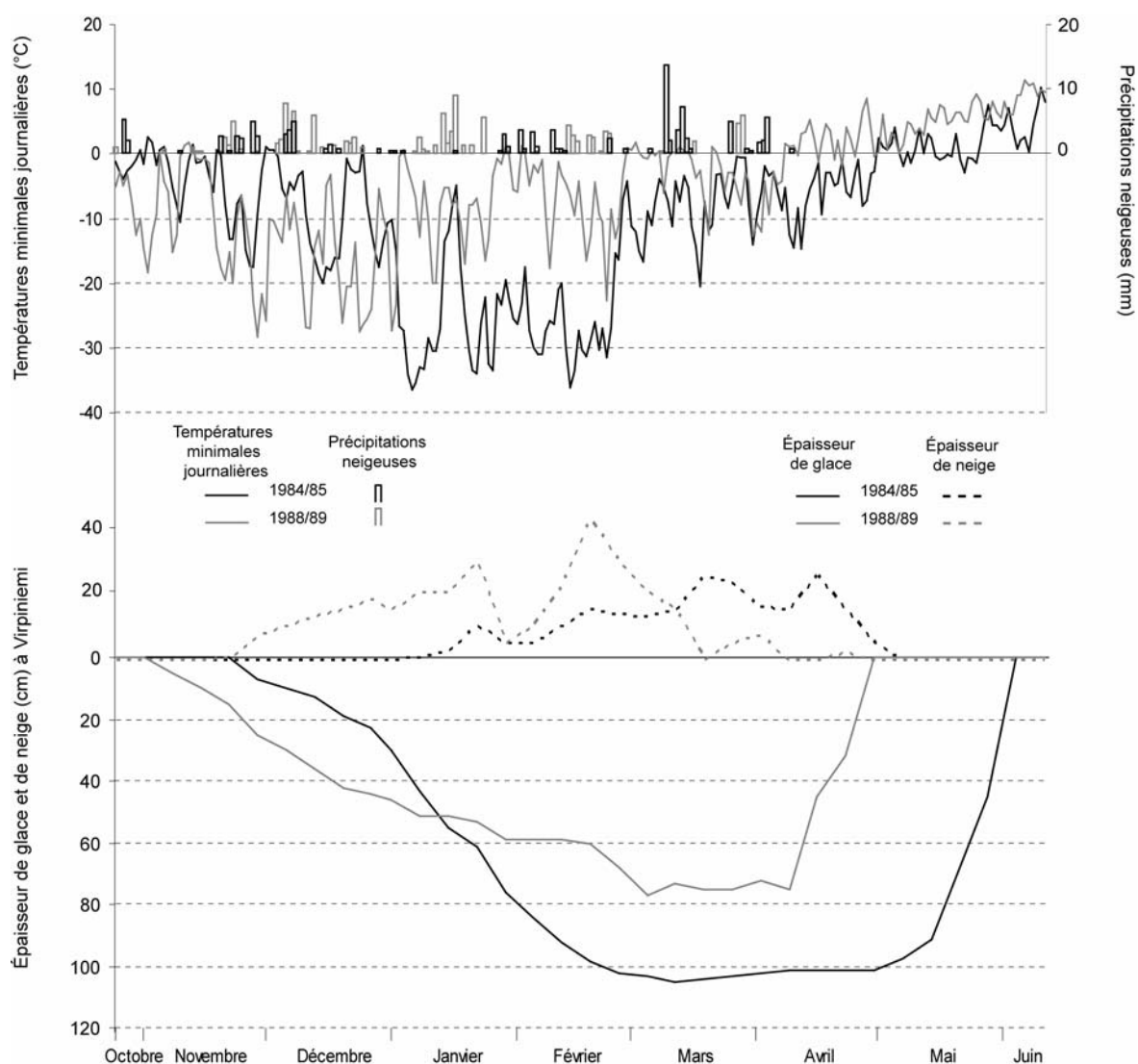
La formation de la banquise côtière à Virpiniemi a débuté plus précocement en 1989, hiver en moyenne plus chaud, qu'en 1985 (graphique 21). Son épaisseur de glace atteint déjà 20 cm à la mi-novembre alors qu'elle n'est que de quelques centimètres à la même période de l'année 1984. Les températures minimales extrêmement froides de l'automne 1988 expliquent cette prise en glace précoce et intense. Cependant, l'augmentation des températures moyennes quotidiennes pendant les mois qui succèdent ne vont faire que ralentir le processus d'épaississement de la banquise, accompagnée de plus, de l'effet isolant d'une couche neigeuse épaisse de 42 cm en février 1989 (suite aux abondantes chutes de neige le mois précédent équivalentes à 34,2 mm). En 1985, certes la formation de la banquise a été tardive, mais elle s'est accrue rapidement avec de très basses températures enregistrées en janvier et février qui ont atteint régulièrement les -30°C .

Ces deux situations peuvent trouver leur explication dans l'analyse des cartes 22 qui exposent ainsi les conditions météorologiques durant ces deux hivers.



Réalisé par Élise Lépy

Graphiques 20 – Écarts à la normale des températures hivernales (Novembre – Avril) de 1957 à 2004 à Oulu
 Graphs 20 – Deviation from average winter temperatures (november – april) from 1957 to 2004 at Oulu

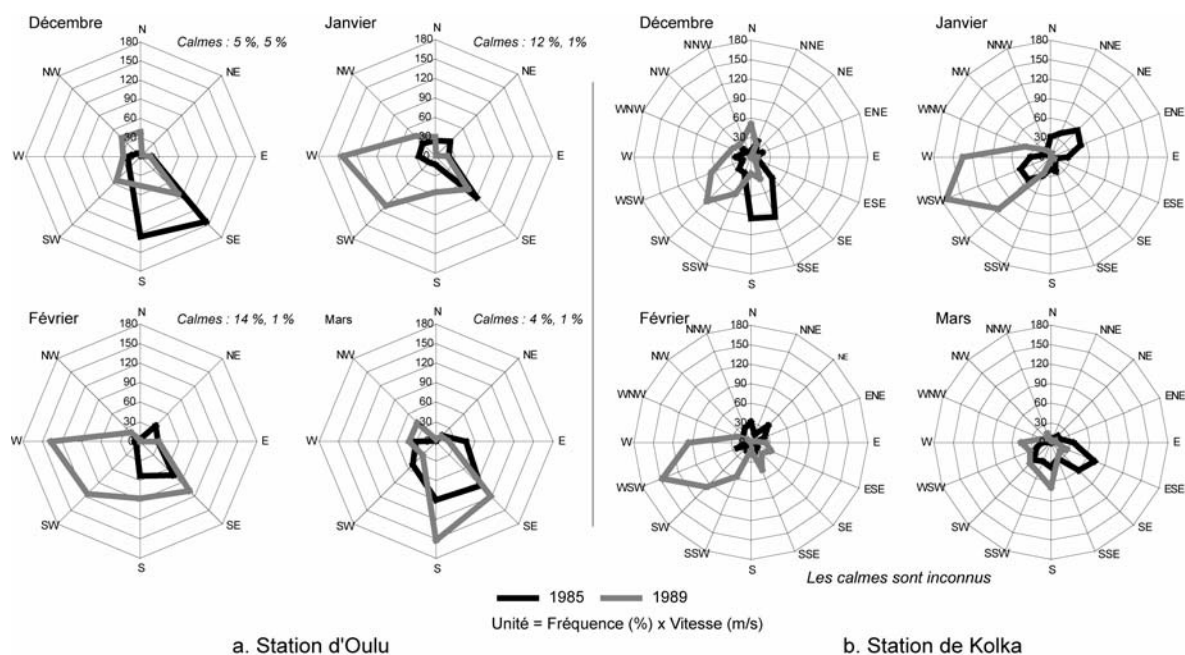


Réalisé par Élise Lépy

Graphique 21 – Situations glacielles et météorologiques à Oulu en 1985 et 1989
 Graphs 21 – Ice and meteorological situations at Oulu in 1985 and 1989

La circulation générale de l'atmosphère se traduit pendant l'hiver 1985 par le stationnement de l'anticyclone de Sibérie sur le Nord-Est de la Fennoscandie et le Nord-Ouest de la Russie. Cet anticyclone apporte déjà de l'air froid au mois de décembre puis s'installe réellement en janvier faisant descendre le thermomètre en-deçà de -40°C en Laponie. Il est tellement important qu'il bloque les remontées d'air chaud qui doivent contourner le continent. L'influence de cet anticyclone apporte donc de l'air sec et froid, peu de précipitations neigeuses et des températures extrêmement basses comme le montre le graphique 21. Souvent un temps ensoleillé est privilégié par la situation anticyclonique. L'hiver 1989, quant à lui, voit une succession de dépressions défilant sur le Nord de l'Europe. Cette situation globalement dépressionnaire est à l'origine des températures douces qu'ont connues les régions de la Baltique, de l'ordre de -1°C en janvier et $+3^{\circ}\text{C}$ en février à Oulu. De plus il a été remarqué que la plus forte anomalie

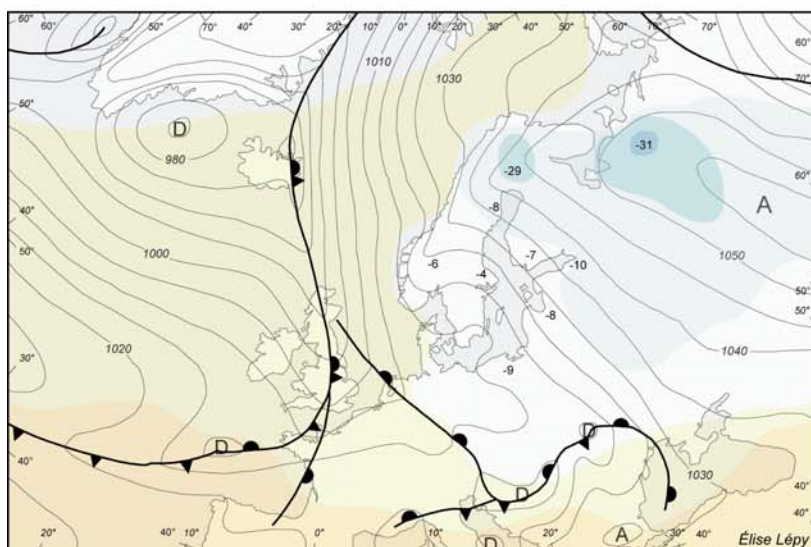
positive de la NAO du XX^{ème} siècle a eu lieu pendant l'hiver 1989 (Tourre, 2002, 8). En effet, l'indice de la NAO était de +2,86 en 1989 et de -0,38 en 1985. La lecture des cartes 22 permet d'observer une succession de dépressions et des vents importants, signes de la dominance des anomalies positives de la NAO. La fréquence et la direction de ces vents sont davantage spécifiées sur les figures 10 qui présentent ce facteur éolien aux stations d'Oulu et de Kolka (au Nord-Ouest de la Lettonie). Effectivement, les faibles vents de décembre 1988 se sont intensifiés et ont changé de direction avec une dominante Ouest et Sud-Ouest. Ainsi, les fameux westerlies qui apportent humidité et douceur ont alors été responsables du faible englacement de la Mer Baltique. En revanche, malgré de forts et fréquents vents de Sud et Sud-Est en décembre 1984, la Mer Baltique a été surmontée par des vents de faible intensité pendant les mois d'hiver laissant place au bel anticyclone de Sibérie.



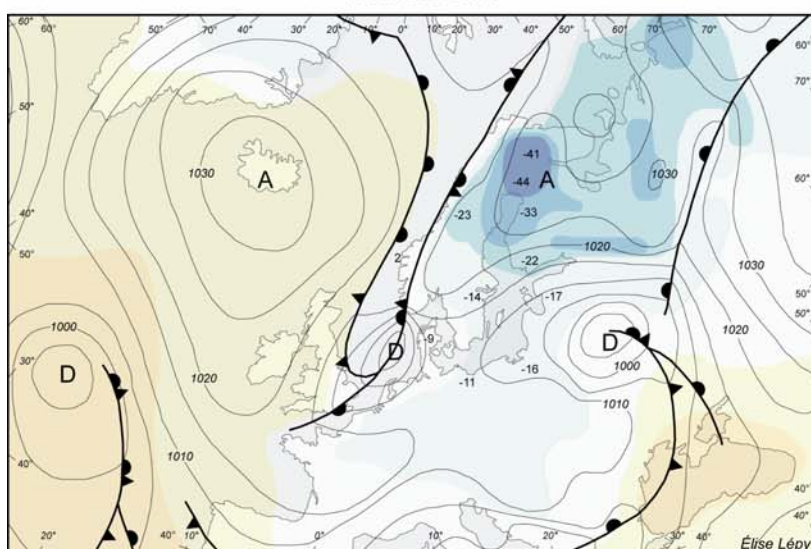
Réalisé par Élise Lépy
d'après Ilmatieteen Laitos,
Главное управление гидрометеорологической службы СССР
(Direction générale du service d'hydrométéorologie de l'URSS)

Figures 10 – Direction des vents dominants à Oulu et Kolka pendant les hivers 1985 et 1989
Figures 10 – Dominant wind direction at Oulu and Kolka in winter 1985 and 1989

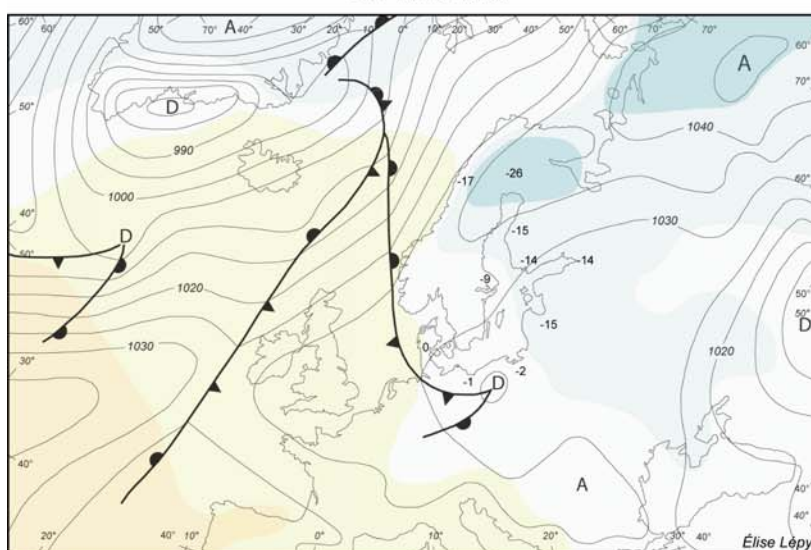
17 Décembre 1984



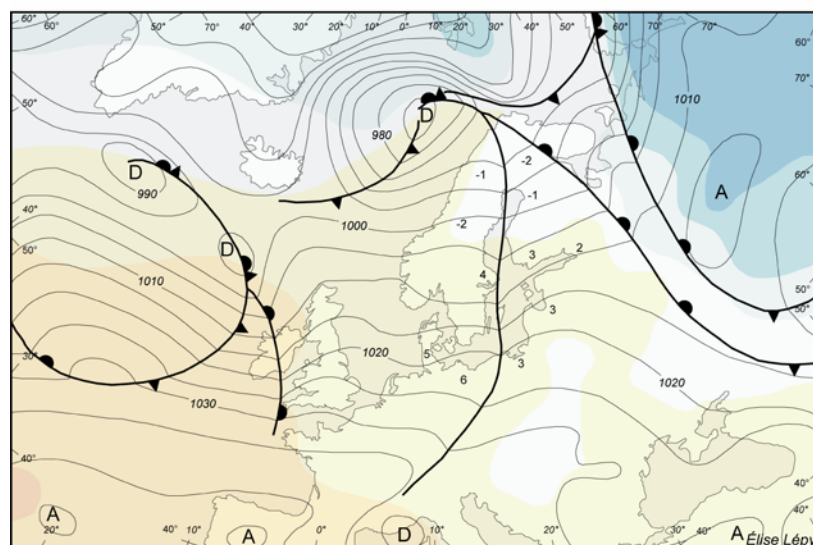
6 Janvier 1985



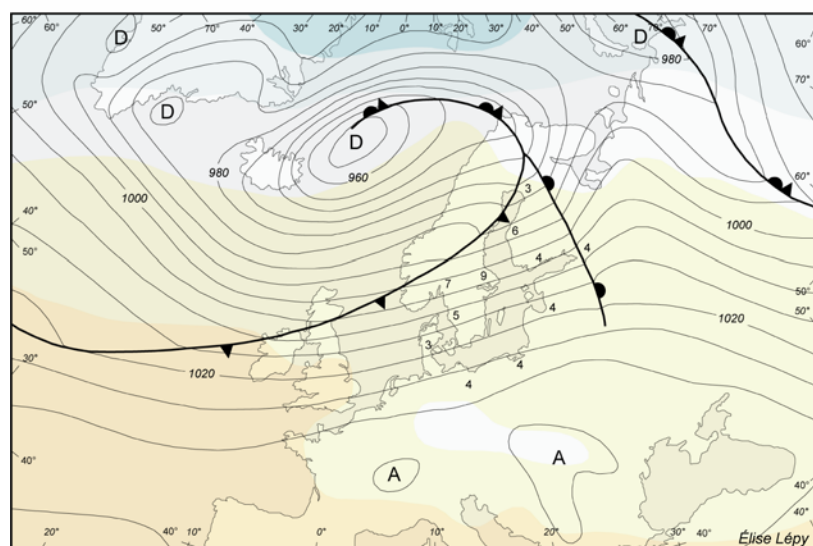
21 Février 1985



5 Janvier 1989



4 Février 1989



- A Anticyclone
- D Dépression
- ▼ Front froid
- ▲ Front chaud
- ⚡ Front occlus
- 1010 — Isobare

Températures de l'air en surface

- < -40°C
- entre -40°C et -30°C
- entre -30°C et -20°C
- entre -20°C et -10°C
- entre -10°C et 0°C
- entre 0°C et 10°C
- entre 10°C et 20°C
- > 20°C

Les chiffres entourant la Mer Baltique correspondent aux températures

Réalisé par Élise Lépy

à partir des Bulletins Météorologiques Européens de Amtsblatt des Deutschen Wetterdienstes

Cartes 22 – Quelques états de l'atmosphère pendant les hivers 1985 et 1989

Maps 22 – Some atmospheric states during winters 1985 and 1989

5.2.6 – Conclusion partielle

Les forçages atmosphériques et climatiques sont responsables de la formation de la glace de mer. Les processus de glaciellisation et de fonte sont donc bien des phénomènes d'origine météomarine qui ont pour effet de changer les propriétés physiques de l'eau de mer. Les effets de l'océan sur l'atmosphère sont bien connus. Ainsi, le changement saisonnier d'état de l'eau de mer modifie les caractéristiques des échanges océan – atmosphère.

5.3 – LA BANQUISE, COMME ELEMENT MAJEUR DU SYSTEME CLIMATIQUE DE LA MER BALTIQUE

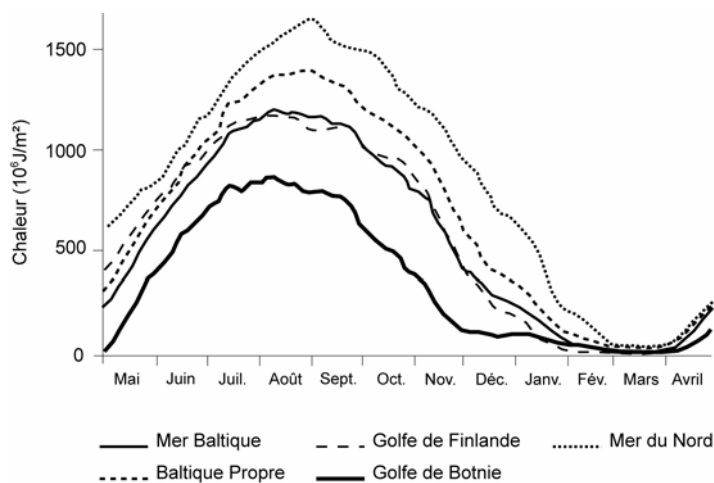
La glace de mer peut être considérée comme une couche fine à l'interface du couplage océan - atmosphère qui affecte la circulation atmosphérique et océanographique, et modifie voire élimine les échanges d'énergie, les flux de chaleur et de radiation (Leppäranta, 1993, 5 ; Haapala et Leppäranta, 1996, 622 ; Haapala, 2000b, 7). Elle est en effet « *un indicateur et un facteur très important des échanges dans le système océan – atmosphère aux hautes latitudes* » (Kergomard, 1990, 53). La glace de mer a ainsi un impact considérable sur les interactions entre la mer et l'atmosphère (Ledley, 1993, 533). Elle a d'abord un effet remarquable sur la surface radiative de la Mer Baltique : couverte ou non par une couche de neige, la glace de mer possède un albédo beaucoup plus élevé que la mer libre. Ensuite, elle se caractérise par une très faible conductivité thermique par son rôle isolant qui limite les échanges d'énergie. La présence de la glace de mer affecte ainsi les températures de la mer et de l'atmosphère ainsi que l'humidité contenue dans les masses d'air.

5.3.1 – Influence des glaces de mer sur le climat

Connaître les processus d'échange énergétique entre l'atmosphère et la mer est essentiel à la compréhension du climat de la Mer Baltique. Ces processus permettent également d'expliquer l'appartenance de cette mer au monde subpolaire (Omstedt et Nyberg, 1996, 644). Les variations des conditions de glace ont une forte influence sur les flux entre la Mer Baltique et l'atmosphère. Ainsi les eaux prises en glace ont des caractéristiques différentes de celles libres de glace : l'évaporation, les flux de chaleur sensible, les radiations et l'albedo divergent. Les conditions météorologiques locales profitent donc de ces disparités (Gustafsson *et al.*, 1998, 2823).

Les étendues de glace de mer changent le bilan thermique de l'atmosphère en augmentant ou en diminuant les échanges de chaleur entre l'océan et l'atmosphère. La banquise a pour impact de restreindre les transferts de chaleur et d'énergie entre la mer et l'atmosphère (Granskog *et al.*, 2005, 188). Quand la banquise est compacte, les flux de chaleur sont beaucoup moins importants et les conséquences directes sur l'atmosphère sont mineures (Vihma et Haapala, 2009, 136). La glace de mer isole alors l'atmosphère de l'océan, limitant ainsi les échanges de chaleur et d'humidité (Jourdain, 2007, 16).

Plus précisément, les importants flux échangés entre l'atmosphère et la mer se font par les transferts thermiques directs *via* les flux de chaleur sensible ou par les changements de phase de l'eau (fusion et fonte) *via* les flux de chaleur latente. Nils Gustafsson *et al.* (1998, 2838) ont étudié les flux de chaleur sensible et latente de la Mer Baltique à l'aide d'un couplage de modèles atmosphérique et océanique qui a mis en évidence la valeur de ces flux en période hivernale. Alors que la banquise empêche l'émission de chaleur sensible, les eaux libres de glace de la Baltique Propre peuvent émettre plus de 200 W.m^{-2} . C. Schrum et J. Backhaus (1999, 530) ont effectivement remarqué que seule une infime part de la chaleur de l'eau est émise dans l'atmosphère pendant l'hiver. Le graphique 22 reprend les valeurs de chaleur émise dans l'atmosphère au cours d'une année. Le Golfe de Botnie est le bassin d'eau qui émet le moins de chaleur : de $800.10^6 \text{ J.m}^{-2}$ en été à une valeur proche de zéro en hiver quand la banquise est formée.



D'après Schrum et Backhaus, 1999, modifié

Graphique 22 - Transfert de la chaleur de l'eau marine vers l'atmosphère en 1983
Graph 22 - Heat transfert from sea water to atmosphere in 1983

C. Kergomard (1983, 21) a aussi observé une influence remarquable des glaces de mer sur les températures observées dans certaines stations côtières de l'Arctique. Ainsi la présence de la banquise refroidirait les températures de l'air des stations voisines. D'autre part, l'auteur précise que l'extension des glaces marines influe également sur « l'équilibre vertical de l'atmosphère, la distribution des pressions et la circulation atmosphérique » (*ibid.*, 23).

De façon plus nuancée à l'échelle du bassin baltique, Timo Vihma et Jari Haapala (2009, 135) estiment que la présence de la glace de mer affecte l'intensité des dépressions à méso-échelle et les conditions météorologiques marines et côtières mais que la Mer Baltique n'est pas assez vaste pour affecter la circulation atmosphérique à l'échelle synoptique.

En hiver, la banquise de la Mer Baltique agit, en définitive comme un espace continental dans le sens que les masses d'air ne se chargent plus en humidité et en chaleur. La glaciellisation de la mer modifie les caractéristiques climatiques de certaines stations littorales dans le sens d'une plus grande « continentalité » (Roussel, 1987, 567). Les caractéristiques des interactions atmosphère – mer sont modifiées saisonnièrement. Toutefois, elles varient également au cours de l'hiver puisque la mer peut être partiellement couverte de glace dans le cas d'une extension de la surface englacée réduite lors d'un hiver doux ou encore présenter des zones libres de glace qui vont, dans les deux cas, modifier de nouveau les échanges d'énergie entre la mer et l'atmosphère.

5.3.2 – Le rôle des ouvertures dans la couche glacielle

La banquise est souvent fracturée et peut présenter de nombreuses ouvertures. Ainsi, Kyösti Laaksonen (1976, 16) souligne l'importance des eaux libres de glace, résultat d'une extension de la surface englacée de la Baltique réduite, dont les impacts thermiques ne sont pas négligeables en hiver. En effet, les ouvertures de la banquise à différentes échelles et à différents moments de la période hivernale sont observées chaque année. Elles concernent principalement les chenaux et les polynies.

Ces ouvertures ont un rôle climatique important puisque la chaleur sensible et latente qu'elles émettent modifie les propriétés de l'atmosphère et plus particulièrement de la couche limite atmosphérique (Vihma et Brümmer, 2002, 1), couche de la troposphère directement influencée par la surface terrestre. Les flux de chaleur sensible sont en hausse au-dessus des eaux libres de glace alors qu'ils sont bien évidemment en baisse quand la banquise est compacte (Overland, 1998, 775). Ainsi, ces eaux « *permettent le réchauffement de l'atmosphère et le refroidissement de l'océan l'hiver* » (Jourdain, 2007, 18). Par la suite elles permettent d'amorcer la fonte estivale comme nous l'avons déjà évoqué auparavant.

T. Vihma et B. Brümmer (2002) ont étudié les variations spatiales des échanges de chaleur et d'humidité entre l'atmosphère et la surface de l'espace englacé. Ils ont montré que, pendant une coulée d'air froid dans le Golfe de Botnie, la couche limite atmosphérique était fortement affectée par les flux de chaleur provenant des chenaux. À titre d'exemple, leur expérience menée à la fin des années 90 dans le Golfe de Botnie rapporte que des flux de chaleur sensible provenant de ces ouvertures pouvaient atteindre 120 W.m^{-2} (Vihma et Brümmer, 2002, 24) et qu'ils étaient donc importants pour

le réchauffement de la couche limite atmosphérique. La modification de cette couche au-dessus de la Mer Baltique en hiver, entraîne souvent la formation ou l'intensification des dépressions à méso-échelle.

À l'instar de simples chenaux, les polynies ont le potentiel pour jouer un rôle important sur le climat. Souvent entretenues par la chaleur latente de fusion dégagée par la formation des glaces de mer qui repart dans l'atmosphère, il arrive aussi qu'elles soient formées par les courants marins qui font fondre de la glace, et transportent de la chaleur sensible (Morales Maqueda, 2004, 3). Ces polynies sont donc des sources de chaleur et d'humidité qu'elles émettent par fortes pertes de la mer vers l'atmosphère entraînant un rapide réchauffement de l'air et donc des modifications des conditions atmosphériques à méso-échelle (*ibid.*, 2).

Les interactions thermiques entre la Mer Baltique et l'atmosphère sont donc plus remarquables quand la glace de mer ne recouvre que partiellement voire pas du tout ses eaux. Les flux de chaleur et d'humidité provenant de la mer libre de glace modifient les caractéristiques des masses d'air (Vihma et Haapala, 2009, 136) et ces ouvertures favorisent le passage et la recrudescence de perturbations (Roussel, 1987, 289).

5.3.3 – L'inertie des conditions d'englacement

Le milieu marin de la Mer Baltique se caractérise par une inertie thermique remarquable. De plus, la glace de mer a une grande inertie thermique (Kraus et Businger, 1994, 73). De ce fait, le couvert de glace de la Baltique introduit deux formes d'inertie thermique dont l'une a déjà été mentionnée. D'une part, la prise en glace et la fonte entraînent la quasi-disparition ou l'émission importante d'énergie. D'autre part, les changements de la banquise se produisent avec un retard par rapport aux conditions météorologiques qui les déterminent. Il existe donc un décalage temporel entre les « *phénomènes atmosphériques responsables des variations de l'extension des glaces et la rétroaction de celles-ci sur le climat* » (Kergomard, 1983, 25). Il est ainsi possible d'observer un décalage systématique de plus d'un mois voire de deux entre les premières températures moyennes positives enregistrées à Oulu et la fonte de la glace de mer sur son littoral (figure 1).

Le rythme saisonnier des températures en Mer Baltique repose sur le même schéma que celui des stations arctiques globalement analysé par C. Kergomard (1983) mais ici de façon beaucoup moins prononcée. Il existe une saison froide qui se prolonge vers le printemps et une légère dissymétrie entre les saisons intermédiaires. Effectivement, la saison froide est prolongée par le printemps car la glace limite le réchauffement d'origine radiative. Il n'est pas rare d'observer des températures moyennes

quotidiennes voire mensuelles pour certaines années (les trois derniers mois d'avril les plus froids : 1929, 1955, 1997) négatives au mois d'avril.

Le décalage printanier est bien plus marqué que celui de l'automne avec de nombreuses variations saisonnières. La persistance des glaces de mer dure jusqu'en mai voire début juin dans le fond du Golfe de Botnie pendant les hivers sévères et jusqu'à la mi-avril dans le Golfe de Riga quand son englacement est total. À l'automne, le décalage entre les premières températures moyennes négatives et le gel des eaux marines est de quelques jours à quelques semaines en fonction de l'intensité du froid qui s'installe. Ceci confirme l'analyse plus générale menée par John Walsh et Claudia Johnson (1979, 6926) en Arctique qui insiste sur l'asymétrie des décalages automnal et printanier entre les facteurs climatiques et les glaces marines.

5.4 – L'ORIGINALITE DU CAS DE LA MER BALTIQUE : L'INTERET D'UNE COMPARAISON AVEC LA BAIE D'HUDSON

Comme nous l'avons déjà évoqué maintes fois, la Mer Baltique est une mer subarctique souvent rattachée au monde arctique du fait de ses conditions glacielles hivernales (carte 1). Or, à ces latitudes, les espaces marins s'identifient par des caractéristiques marines hivernales qui leur sont propres du fait de leur taux de salinité, de la distribution géographique des courants marins et de bien d'autres facteurs. Toutefois, comme la carte 1 le montre bien, les mers de même latitude que la Baltique présentent un état différent de leurs eaux marines durant l'hiver. Par conséquent, le cas de la Mer Baltique semble en soi intéressant. En effet et à titre d'exemple, la Baie d'Hudson située en Amérique du Nord prend en glace tous les hivers alors que la Mer de Norvège n'est jamais englacée pour des raisons océanologiques bien connues, l'influence de la dérive Nord-Atlantique qui y déplace des eaux marines chaudes. Cependant, la Mer Baltique et la Baie d'Hudson ne présentent pas exactement les mêmes conditions de prise en glace, bien plus sévères sur la façade orientale du continent américain que sur la façade occidentale de l'Europe.

Les glaces de la Baie d'Hudson ont fait l'objet de nombreuses études (Martini, 1986 ; Prinsenberg, 1986 ; Shilts, 1986 ; Josenhans et Zevenhuizen, 1990 ; Melling, 2002 ; Houser et Gough, 2003 ; Gough et *al.*, 2004 ; Gagnon et Gough, 2005) et ont été quelques fois mentionnées dans les travaux sur la Mer Baltique à titre de comparaison (Roussel, 1987 ; Omstedt et Chen, 2001). La comparaison entre les deux espaces marins est intéressante puisqu'elle permet d'apprécier l'influence des diverses conditions atmosphériques et climatiques sur la prise en glace des eaux marines.

5.4.1 – Deux domaines marins géomorphologiquement semblables

La Mer Baltique et la Baie d'Hudson présentent un contexte géomorphologique assez similaire puisque cette dernière est bordée par les terres du bouclier canadien formé de roches précambriennes et primaires comme le socle fennoscandien.

Tout comme la Mer Baltique en Europe du Nord, la Baie d'Hudson est tangente au cercle polaire arctique et elle est considérée comme la plus vaste mer intérieure d'Amérique du Nord (Martini, 1986, 117 ; Gagnon et Gough, 2005, 371), reliée à l'Océan Arctique par les détroits de Foxe et de Fury et Hecla au Nord, et à l'Océan Atlantique par le détroit d'Hudson à l'Est. Les échanges d'eau de ce grand bassin de plus de 822 000 km² (L'Encyclopédie canadienne), sont ainsi limités à ces détroits. La morphologie des fonds marins de la Baie d'Hudson n'est pas très accidentée. Cette baie est constituée principalement de deux bassins séparés par un seuil, le banc Midbay orienté Sud-Nord. La profondeur de la Baie d'Hudson reste cependant moyenne avec une profondeur maximale de 250 mètres au Nord-Ouest (Pelletier, 1986, 144). L'évolution des côtes actuelles de la Baie d'Hudson résulte du retrait du glacier laurentidien durant la dernière grande déglaciation qui s'est produite il y a 8 000 ans (Shilts, 1986, 74). Tout comme en Fennoscandie, les terres septentrionales de l'Amérique du Nord subissent donc les conséquences du rebond isostatique. Ainsi les rivages Est de la Baie d'Hudson connaissent des mouvements isostatiques de l'ordre de 60 cm par siècle (Josenhans et Zevenhuizen, 1990, 2).

5.4.2 – Les conditions glacielles divergentes de la Baie d'Hudson et de la Mer Baltique

La Baie d'Hudson offre néanmoins des conditions de salinité plus développées qu'en Mer Baltique car elle est plus ouverte aux influences océaniques. Elles varient en surface de 10 PSU à l'embouchure des cours d'eau à 30 PSU au centre et au Nord-Est de la baie (Prinsenbergh, 1986, 163). Les conditions salines sont donc moins favorables au gel de l'eau marine en Baie d'Hudson qu'en Mer Baltique aux eaux plus douces.

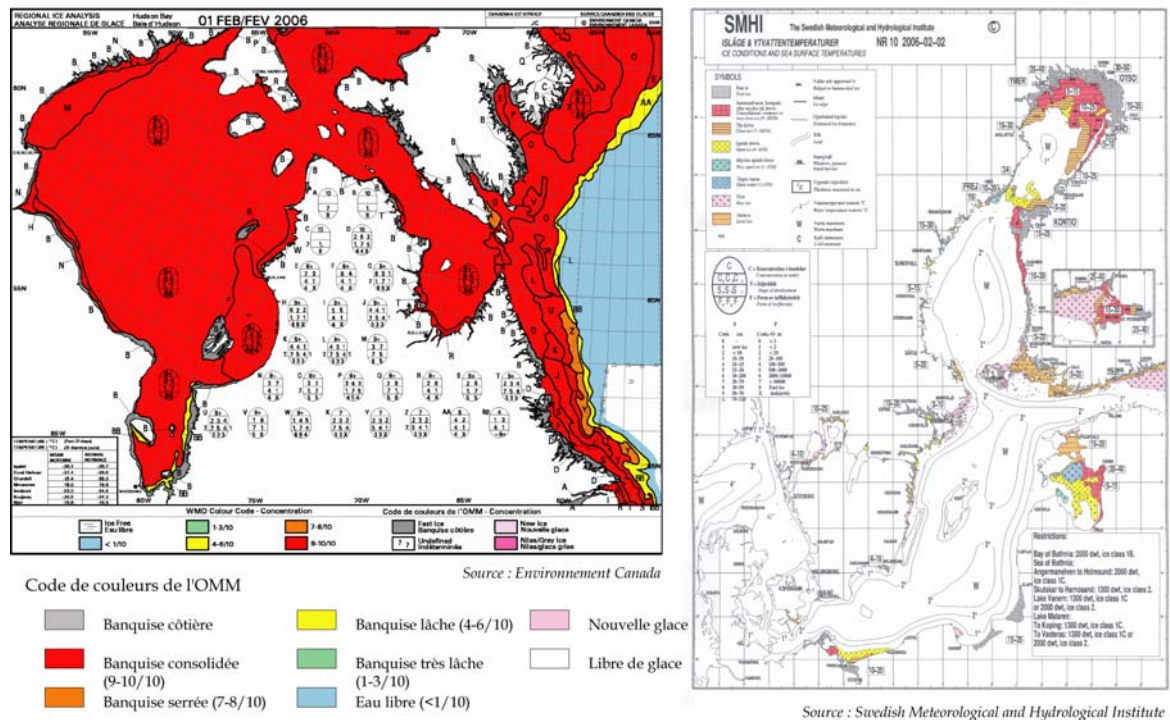
Cependant, les conditions glacielles de la Baie d'Hudson sont plus sévères que celles de la Mer Baltique. En effet, la baie est pratiquement complètement gelée chaque année et son cycle glaciaire est beaucoup plus long. Ainsi, les eaux marines de la Baie d'Hudson prennent en glace tous les hivers et ne deviennent libres de glace qu'en été. Les premières glaces marines se forment durant les derniers jours du mois d'octobre. Et, en décembre, la totalité de la baie et de ses détroits est recouverte par la banquise. C'est seulement au début du mois d'août que les eaux marines sont libres de glace (Markham, 1986, 106-111 ; Gagnon et Gough, 2005, 371), le dégel progressant depuis l'Océan Arctique vers le Sud (Roussel, 1987, 292). Le tableau 17 souligne cette disparité des conditions

glacielles en Mer Baltique et en Baie d'Hudson. Alors que tous les paramètres physiques des deux mers intérieures sont relativement semblables, leurs conditions d'englacement présentent des différences notables sur la durée de l'englacement, l'épaisseur de glace et l'extension maximale du couvert de glace.

	Mer Baltique	Baie d'Hudson
Nombre de mois d'englacement	4 à 7 mois	6 à 9 mois
Début de l'embâcle	Novembre	Fin octobre
Banquise permanente	Février	Décembre
Fin de la débâcle	Mai	Début août
Maximum de l'épaisseur de glace	Mars	Avril Mai
Extension maximale	10 à 100 %	100 %

Tableau 17 – Quelques caractéristiques glacielles en Mer Baltique et en Baie d'Hudson
Table 17 – Some ice characteristics in Baltic Sea and Hudson Bay

À titre d'exemple, intéressons-nous à l'hiver 2006. Les deux cartes 23 ci-dessous présentent l'état de l'englacement de la Baie d'Hudson et de la Mer Baltique au début du mois de février. Elles sont facilement comparables puisqu'elles adoptent toutes les deux le code de couleurs de l'Organisation Météorologique Mondiale. Il est ainsi aisé d'observer que les eaux de la Baie d'Hudson sont prises en glace sur l'ensemble de l'espace marin alors que seules les eaux des fonds des trois golfes et les eaux côtières de la Baltique sont englacées. De plus, la banquise de la Baie d'Hudson est à cette date-là quasi consolidée dans son entier alors que celle de la Mer Baltique est toujours en phase de formation avec des stades différents de sa croissance (consolidée, serrée, lâche).

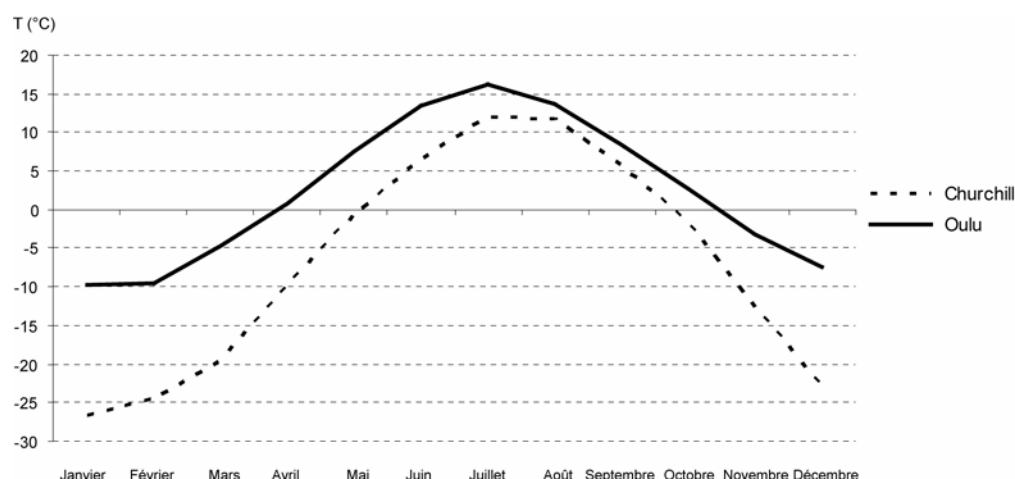


Cartes 23 – L’englacement de la Baie d’Hudson et de la Mer Baltique le 2 février 2006
Maps 23 – Ice extent in Hudson Bay and Baltic Sea on February 2nd 2006

5.4.3 – Les facteurs climatiques et atmosphériques

Les causes de ces comportements glacio-marins différents entre ces deux domaines tiennent à des régimes climatiques thermiques très contrastés sinon opposés que soulignent bien l'opposition de façade océanique entre l'Ouest et l'Est de l'Atlantique.

Ainsi, Alexandre Gagnon et William Gough (2005) précisent que les températures de la Baie d'Hudson sont anormalement plus froides que celles des régions de même latitude. À Churchill (Manitoba), station météorologique située sur la côte ouest de la Baie d'Hudson aux 58° 44' Nord, les températures moyennes estivales n'atteignent juste que les 12°C et seulement quatre mois de l'année comptent des températures moyennes positives alors que la station météorologique d'Oulu, située à des latitudes plus nordiques, en enregistre sept. Or les plus importantes disparités thermiques ont lieu pendant la saison hivernale : Churchill enregistre -26,7°C de température moyenne en janvier alors qu'Oulu seulement -9,7°C (graphique 23).



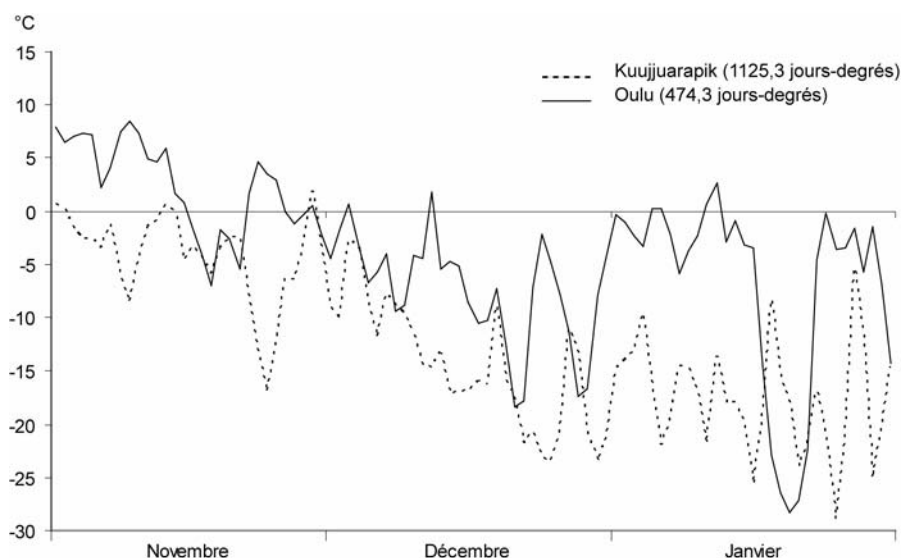
Réalisé par Élise Lépy

Graphique 23 – Températures moyennes mensuelles aux stations d'Oulu (Finlande, 65° N) et de Churchill (Manitoba, Canada, 58°44' N) pour la période 1971 - 2000

Graph 23 – Average monthly temperatures at Oulu (Finland, 65°N) and at Churchill (Manitoba, Canada, 58°44' N) for the period 1971 - 2000

D'ailleurs d'un point de vue bioclimatique, Kenneth Hare et Morley Thomas (1974, 129) incluent la Baie d'Hudson dans la zone climatique arctique où la toundra prédomine sur les terres environnantes. En revanche, les auteurs européens-nordiques emploient l'adjectif « boréal » pour qualifier les régions septentrionales boisées de la Scandinavie et de la Finlande. Effectivement, les régions septentrionales du Canada connaissent un climat où la continentalité est bien plus accentuée qu'en Fennoscandie. Ce climat est caractérisé par la faiblesse des précipitations (431,6 mm/an pour la période 1971-2000 à Churchill) assez équivalentes à celles enregistrées à Oulu (445,7 mm/an), et surtout par une amplitude thermique bien plus importante : 38,4°C à Churchill contre 25,9°C à Oulu.

Le cas de l'hiver 2006 confirme cette disparité thermique entre les deux domaines. Les valeurs des températures moyennes quotidiennes expliquent en partie le fort englacement de la façade occidentale de l'Atlantique (graphique 24). En novembre, la région environnante de la Baie d'Hudson enregistre déjà des températures moyennes négatives qui, logiquement, se refroidissent au fil des jours, alors qu'il faut attendre le mois de décembre pour avoir des températures moyennes négatives notables à Oulu. De ce fait la somme des jours-degrés inférieurs à zéro, très nettement plus supérieure à la station canadienne qu'à la station finlandaise, confirme la sévérité de l'hiver nord-américain face à la « douceur » relative de l'hiver fennoscandinave.



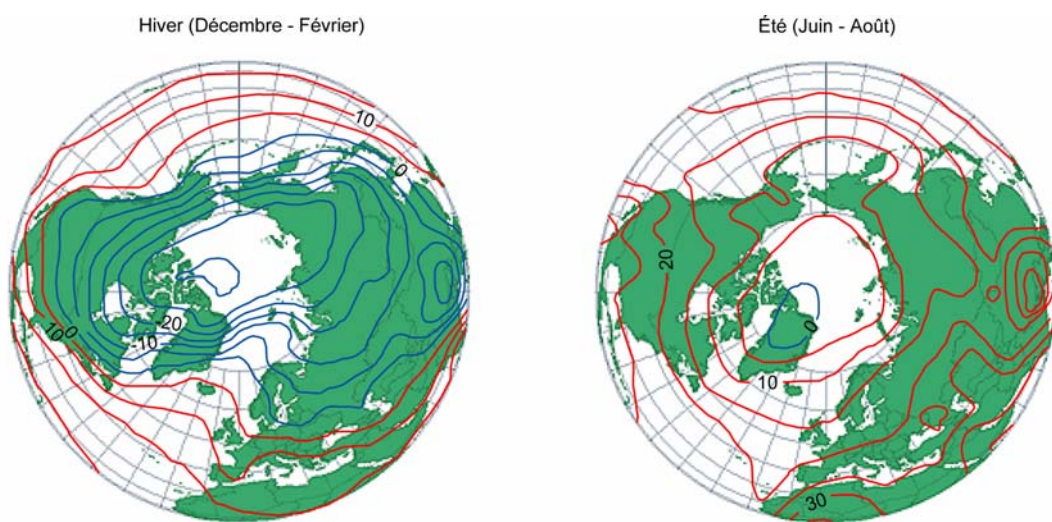
Réalisé par Élise Lépy
d'après Environnement Canada et Finnish Meteorological Institute

Graphique 24 – Les températures moyennes quotidiennes de novembre 2005 à janvier 2006 à Kuujjuarapik (55° 16' N, Province de Québec) et à Oulu (65° N)

Graph 24 – Average daily temperatures from november 2005 to january 2006 at Kuujjuarapik (55° 16' N, Province of Quebec) and at Oulu (65° N)

Comme nous l'avons vu précédemment, un tel contraste d'ordre thermique s'explique, bien entendu, par les conditions atmosphériques. En effet, d'un point de vue synoptique, les masses d'air affectant ces deux régions n'ont pas la même origine et n'influent donc pas de la même façon.

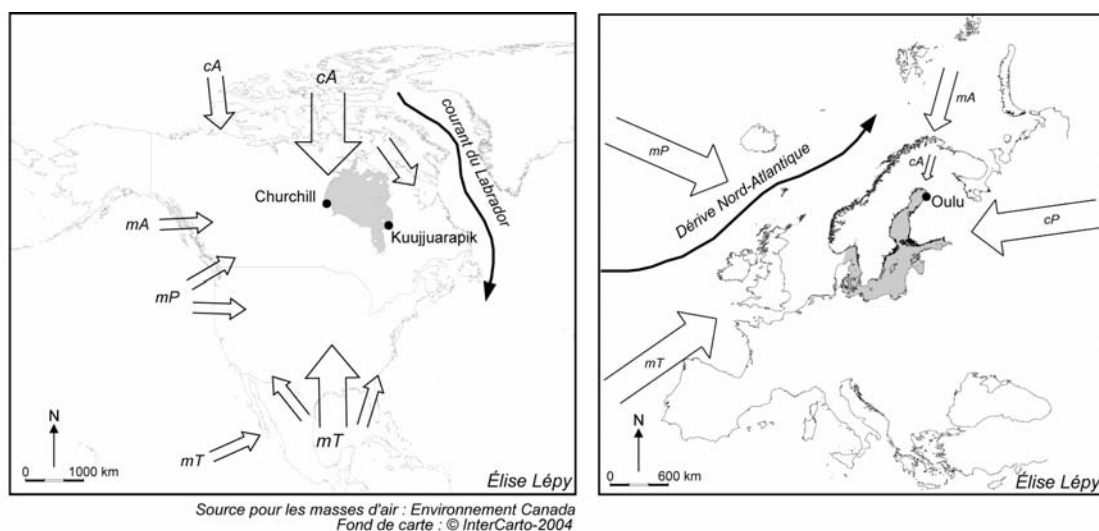
En hiver, le Canada septentrional est recouvert de neige et ses eaux arctiques sont englacées. Ces régions nordiques sont souvent sous l'influence des masses d'air continental arctique (cA) qui descendent des régions arctiques englacées. Cet air froid et sec se forme sur la banquise et les îles de l'Océan Glacial recouvertes de glaces (Amat *et al.*, 2002, 80). Entretenu par l'anticyclone polaire du Manitoba, il réserve des froids intenses et des records de basses températures (-45°C à Churchill, Manitoba). Les descentes de coulées d'air froid arctique sont bien plus intenses sur le Nord-Américain que sur l'Europe (figure 11). Ainsi, la façade orientale du continent américain enregistre des températures beaucoup plus froides que les régions de même latitude situées en Europe. Comme cela a déjà été évoqué dans le deuxième chapitre, la Mer Baltique reçoit de l'air arctique adouci par les eaux non gelées de l'Océan Arctique, dû à l'apport d'eau plus chaude par la dérive nord-atlantique. Cet air maritime arctique qui arrive sur la Mer Baltique n'est donc pas aussi froid et sec que l'air continental arctique qui sévit sur la Baie d'Hudson (cartes 24). D'autre part, la présence du courant marin froid du Labrador en Atlantique Ouest qui descend le long des côtes américaines contribue à la froidure du climat du Nord-Est américain.



Source : Mc Bean et al., 2005, 24, modifié

Figure 11 – Températures moyennes (°C) de l’air en surface en hiver et en été dans l’hémisphère Nord (1952-2003)

Figure 11 – Average air temperatures (°C) in winter and summer in the northern hemisphere (1952 – 2003)



Cartes 24 – Les masses d’air affectant la Baie d’Hudson et la Mer Baltique et les courants océaniques
Maps 24 – Air masses affecting the Hudson Bay and the Baltic Sea and ocean currents

5.5 – CONCLUSION : LA PARTICULARITE DE LA MER BALTIQUE

En dépit de leur situation latitudinale analogue, la Mer Baltique et la Baie d’Hudson présentent donc des conditions de glaciellisation très différentes. La latitude n’est donc pas l’unique facteur géographique à jouer un rôle dans la prise en glace des eaux marines. Le climat et l’état de l’atmosphère ont une influence majeure sur l’englacement des plans d’eau. Dans le cas d’une comparaison à l’échelle globale, on

constate donc que la source majeure de la sévérité de l'englacement d'une mer dépend principalement de celle de son climat régional. La provenance et la trajectoire des masses d'air influent donc sur le régime thermique de l'atmosphère.

L'originalité du cas de la Baltique réside dans la variabilité spatio-temporelle de son englacement contrairement à la Baie d'Hudson qui gèle complètement chaque année. Effectivement, la Mer Baltique est plus sensible aux phénomènes de latitudes moyennes puisque son débouché est méridional (Roussel, 1987, 292). Bien qu'elle soit en situation d'abri – à l'Est de la chaîne des Scandes – elle bénéficie, toutefois, de par sa situation en façade occidentale du continent, des influences océaniques douces. La variabilité spatio-temporelle des conditions glacielles impose alors des rétroactions sur le milieu physique littoral variées et des réactions sociétales adaptées.

L'action des glaces de mer sur la morphologie littorale

En plein cœur de l'hiver, la banquise côtière ne bouge que très peu puisqu'elle est fixée au rivage. Ce n'est qu'en périodes de formation et de fonte que les glaces de mer sont mobiles, dérivent et sont poussées sur la côte. Il semble alors difficile d'ignorer certaines interrogations sur l'action des glaces flottantes sur les littoraux de la Baltique. Il s'agit dans ce chapitre de se demander quelle est la portée de l'érosion glacielle dans l'évolution actuelle des littoraux. Un état des lieux sur l'érosion littorale en Mer Baltique s'impose d'abord afin d'observer l'état actuel des côtes et leur évolution avant de se poser les questions relatives à l'action des glaces de mer sur la morphologie littorale.

6.1 – L'ÉROSION LITTORALE EN MER BALTIQUE

L'érosion littorale est un phénomène mondial qui touche actuellement de nombreuses côtes et dont les causes sont multiples (Paskoff, 1981). Remontée du niveau marin, changements climatiques, augmentation du nombre et de la vitesse des tempêtes sont souvent attribués par les chercheurs comme étant les principales raisons de la destruction des rivages. Toutefois, le problème de l'érosion dépend avant tout du milieu littoral considéré et des caractéristiques de son substrat, sans oublier, bien entendu, le rôle circonstanciel des aménagements humains.

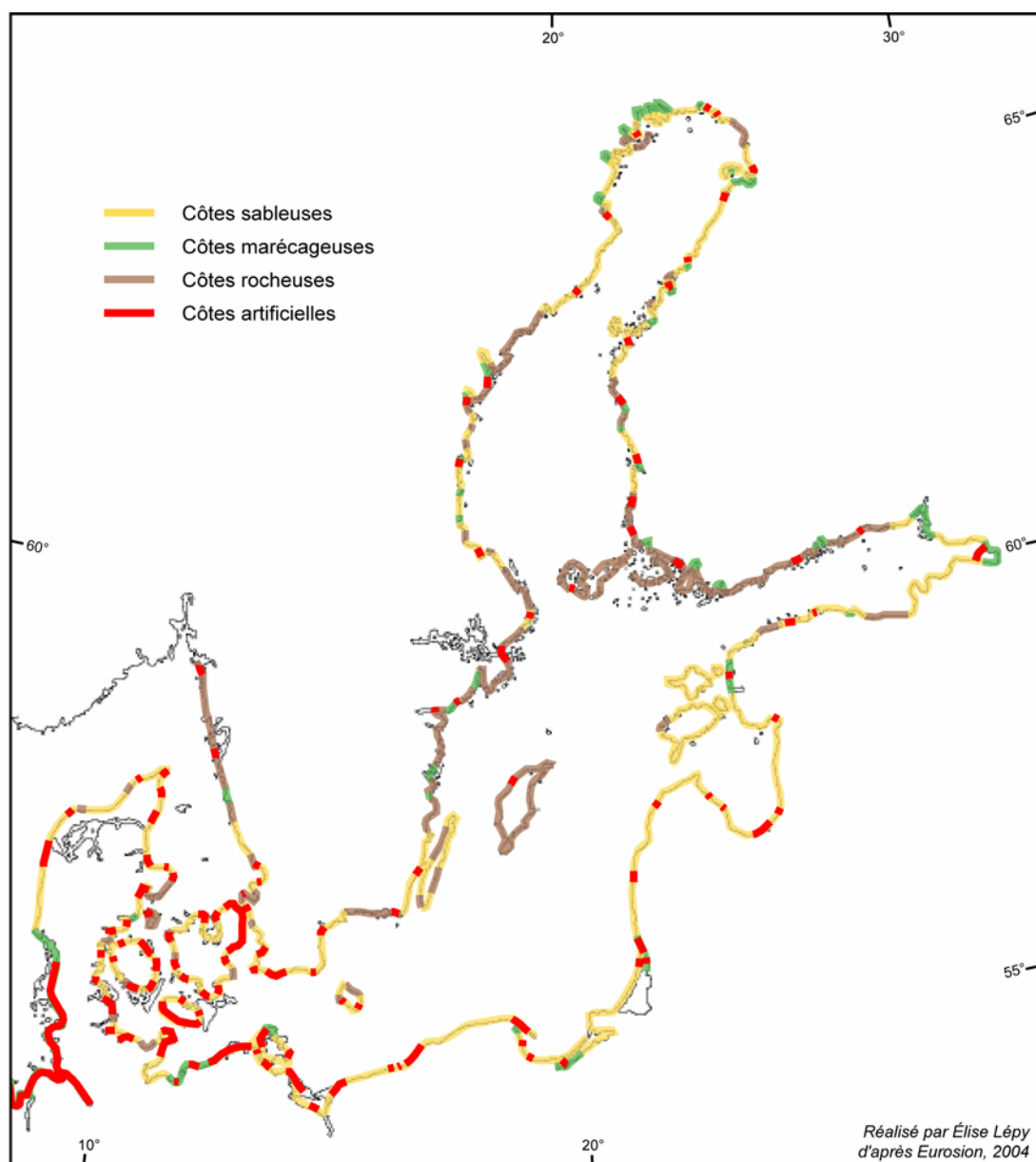
6.1.1 – Les types de côte

Les formes de relief des côtes de la Baltique sont illustrées par la carte 5 présentée en première partie. Alors que le Nord du Golfe de Botnie est occupé par des couches sédimentaires bordées par des côtes sableuses, les littoraux du Sud de la Finlande et de l'Est de la Suède se caractérisent majoritairement par des côtes rocheuses avec de nombreux archipels au tracé très sinueux. De son côté, la Baltique méridionale est largement frangée de côtes sableuses (carte 25). Enfin, de nombreuses embouchures de fleuves et de cours d'eau côtiers contribuent au maintien de zones marécageuses littorales.

Les côtes sableuses de la Baltique se sont développées principalement sur le matériel d'origine pléistocène tels les moraines et les dépôts fluvio-glaciaires (Musielak *et al.*, 2004, 31). Elles représentent 38% (tableau 18) des côtes finlandaises et suédoises essentiellement concentrées dans le Golfe de Botnie. Dans nos deux sites d'étude, si le littoral d'Oulu est tout à fait plat et compte d'étroites plages de sable souvent végétalisées, en revanche 95% du littoral letton sont bordés de plages sableuses dont 20% forment de basses falaises. Composées de sables et d'argiles, ces falaises sont facilement exposées à l'érosion par l'infiltration des eaux souterraines d'origine continentale et par l'action des vagues. Les côtes du Golfe de Riga sont également constituées de dunes stabilisées par le couvert végétal. D'un point de vue géomorphologique, le littoral de Jurmala – Riga est un espace côtier relativement plat. Il est constitué de deux « baies » au tracé concave dont l'intersection localise l'embouchure de la Daugava. Cette côte est caractérisée par des plages de sable de 40 à 60 mètres de large (EuroSION Latvia).

Toutefois, s'individualisent les quelques kilomètres de côtes rocheuses au Nord d'Oulu et celles de l'archipel de Luleå, côté suédois. Le Golfe de Riga, quant à lui, est dépourvu de tout littoral rocheux. Les embouchures des cours d'eau côtiers (Kalixälven, Luleälven, Daugava...) sont souvent des espaces littoraux marécageux tels les marais maritimes de Liminka (Sud d'Oulu).

Contrairement au littoral Sud-Ouest de la Baltique, la Baie de Botnie et le Golfe de Riga ne comptent que très peu d'ouvrages artificiels sur leurs côtes. Ainsi, seuls 1% des côtes finlandaises et suédoises et 3% des côtes lettones sont artificialisées, soit 25 kilomètres dans la région d'Oulu et 48 km sur le littoral letton (tableau 19). Parmi ces ouvrages, on compte majoritairement les ports, quelques digues, et les littoraux urbanisés comme à Jurmala.



Carte 25 – Les types de côtes des littoraux de la Baltique en 2001
 Map 25 – Coastal types on littorals of the Baltic Sea in 2001

	Longueur du littoral en km	Côtes rocheuses en %	Côtes sableuses en %	Côtes marécageuses en %	Côtes artificielles en %	Autres (estuaires ...) en %
Finlande	14018	57	38	4	1	0
Suède	13567	56	38	5	1	0
Lettonie	534	0	95	2	3	1

Source : EuroSION, 2004

Tableau 18 – Les types de côtes en Finlande, Suède et Lettonie
 Table 18 – Coastal types in Finland, Sweden and Latvia

6.1.2 – L'évolution actuelle des littoraux de la Mer Baltique

Le projet Eurosion initié par la Commission Européenne révèle de manière générale une aggradation des côtes de la Mer Baltique (carte 26) notamment celles du Golfe de Botnie, outre quelques sites d'érosion présents plus particulièrement dans la Baltique méridionale. D'après les conclusions de ce projet, en ce qui concerne nos deux sites d'étude, la Baie de Botnie semblerait épargnée par l'érosion et le Golfe de Riga subirait des effets non négligeables.

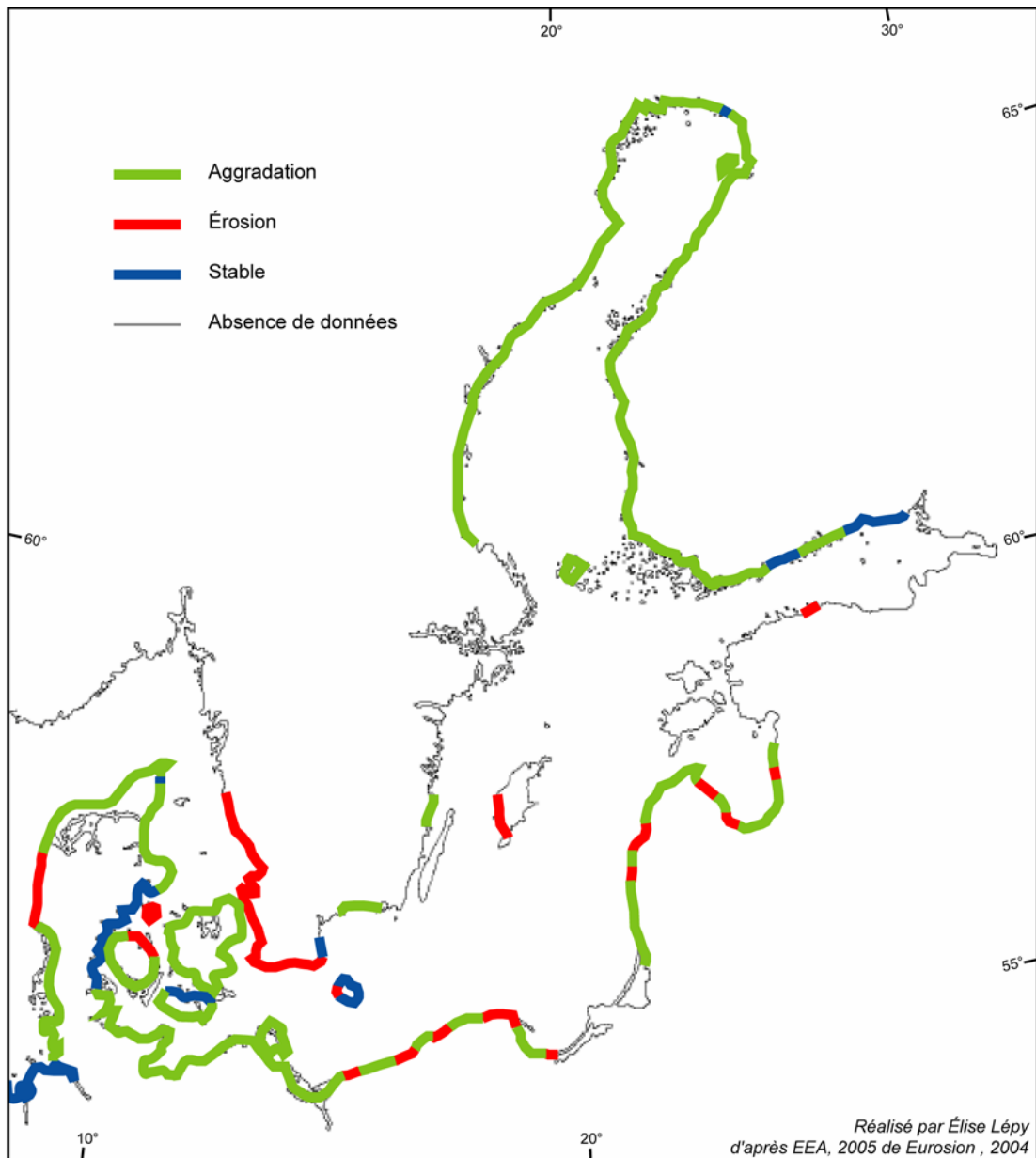
On sait que l'érosion littorale est définie comme une perte de substance (Dionne, 1999, 8) aux dépens du substrat côtier. Elle est caractérisée par un déficit sédimentaire prononcé des côtes sableuses et par un recul des côtes à falaises. L'érosion littorale résulte de deux groupes d'agents : littoraux et subaériens d'origine continentale. Les vagues sont bien entendu le processus principal d'érosion en particulier en matériel meuble, sachant que les courants et le vent contribuent également à l'érosion. Et il convient de ne pas omettre le rôle des glaces marines dans l'érosion des littoraux froids ! Leurs actions sont bien évidemment à prendre, ici en considération.

L'évolution actuelle des littoraux de la Mer Baltique doit bien entendu, prendre en compte les effets contemporains du rebond isostatique postglaciaire mentionné en première partie de ce travail. En effet, le Nord du bassin de la Baltique est au cœur de ce soulèvement dont les incidences sont considérables sur l'évolution des côtes. Le littoral de la région d'Oulu observe ainsi une aggradation prononcée de ses plages sur l'origine de laquelle il faut s'interroger : s'agit-il d'une sédimentation importante ou les effets de ce rebond isostatique ?

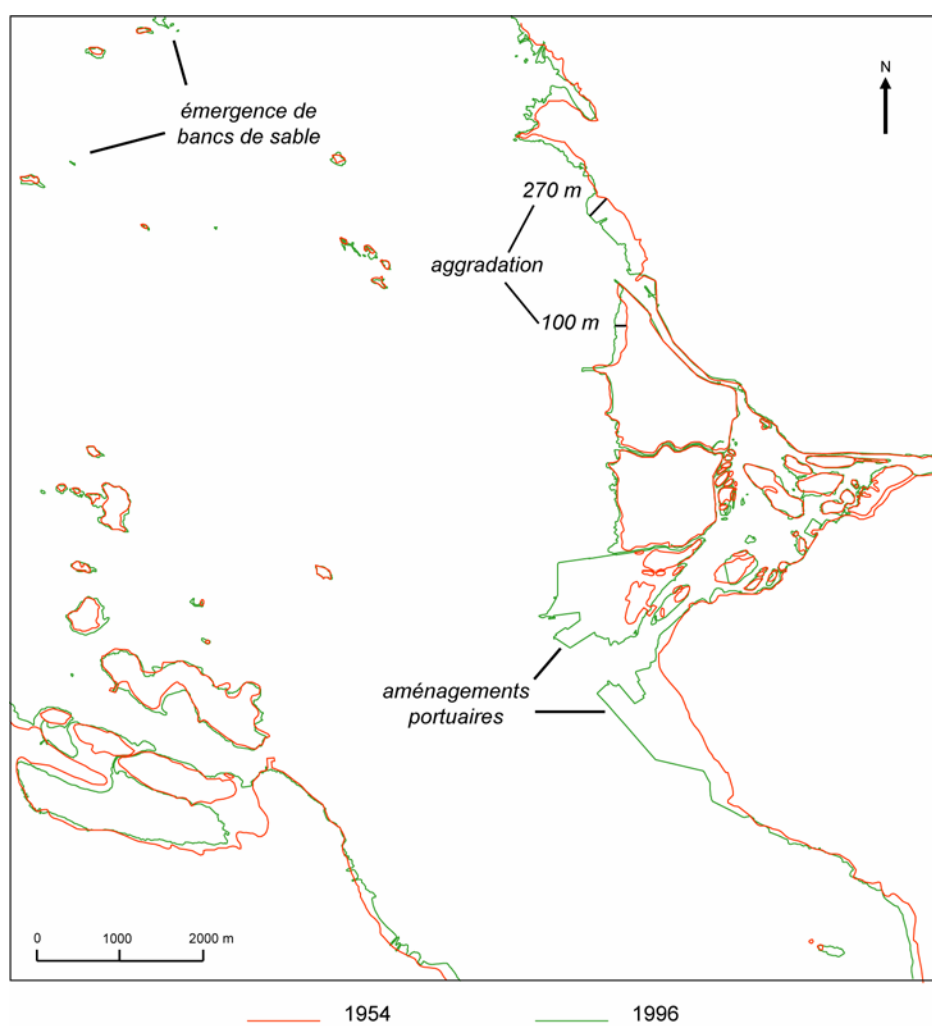
Au travers du traitement informatique de cartes topographiques, nous avons pu reconstituer l'évolution du trait de côte du littoral de la ville d'Oulu (carte 27) entre 1954 et 1996. Le document présente le résultat de processus d'avancée spectaculaire de la côte vers la mer. Souvent, il est notable que la côte ait gagné quelques dizaines de mètres en une quarantaine d'années. Cette avancée s'exprime également par l'unification d'îles et l'apparition de nombreux îlots ou plutôt bancs de sables. D'ailleurs, certains pêcheurs nous ont confirmé que depuis qu'ils pratiquent la pêche, ils ont vu apparaître de nombreux bancs de sable de petite superficie. D'autre part, la carte laisse apparaître l'inévitable aménagement côtier qui, dans ce cas, est associé aux différents terminaux du port d'Oulu.

À une autre échelle, le littoral de la région d'Oulu recouvre, avec plus de 730 kilomètres, une bonne partie des côtes finlandaises de la Baie de Botnie. Sur ce total, seuls deux kilomètres de côtes sont érodées. Par ailleurs, du côté suédois de la baie, l'érosion côtière est inexistante (tableau 19). D'après l'étude menée par Eurosion en 2004, la Baie de Botnie et plus généralement le Golfe dans son ensemble serait donc soumise à des

processus d'aggradation et d'accumulation de sédiments sur les côtes. On sait aussi que la côte est ici sous l'influence du rebond isostatique et le soulèvement est de l'ordre de 7 mm/an (carte 6) sur le littoral finlandais. L'évolution du trait de côte conclut ainsi à une avancée du littoral.



Carte 26 – État de l'érosion côtière en Mer Baltique en 2004
Map 26 – Coastal erosion in the Baltic Sea in 2004



Réalisé par Élise Lépy
d'après la carte topographique 2444-Oulu-1/100 000 de 1954 et la carte géoréférencée 2444-Oulu de 1996

Carte 27 – Évolution du trait de côte à Oulu entre 1954 et 1996

Map 27 – Oulu coastline evolution between 1954 and 1996

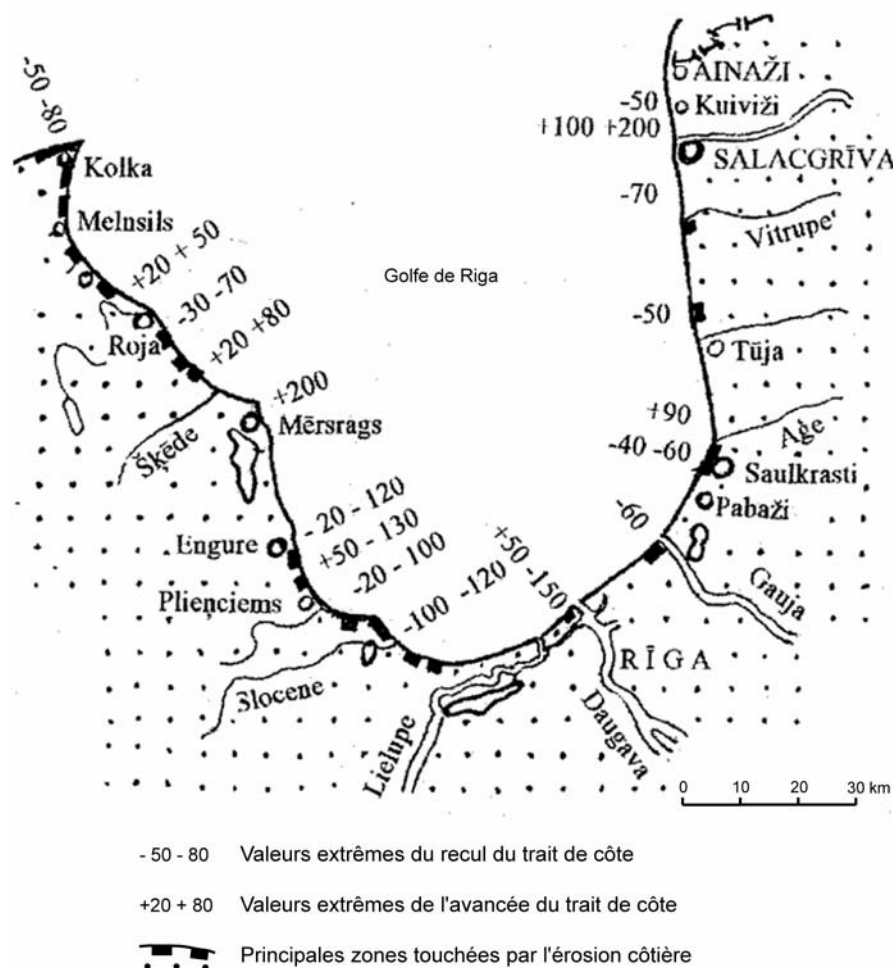
	Longueur du littoral en km	Côtes érodées en km	Côtes artificielles en km
Övre Norrland	2726,7	0	5
Oulu	730,2	2	25
Lettonie	534	175	48

Source : EuroSION, 2004

Tableau 19 – L'érosion des régions d'Övre Norrland, d'Oulu et de la Lettonie

Table 19 – Erosion in the regions of Övre Norrland, Oulu and Latvia

Le littoral letton est soumis de façon modérée à l'érosion avec ses 175 kilomètres de côtes érodées. La carte 28 reprise de Guntis Eberhards (2003) apporte quelques indications chiffrées sur l'ampleur du phénomène. Ainsi pendant la seconde moitié du XX^{ème} siècle, la côte basse et sableuse de l'Ouest du golfe, la côte de Kurzeme, a connu des phases d'érosion notables atteignant entre 40 et 100 mètres de recul et un taux moyen d'érosion de 0,1 à 0,5 m / an (Eberhards et Saltupe, 1996, 21). Le littoral de Roja à Jurmala est le plus particulièrement touché puisqu'il a subi jusqu'à 120 mètres de retrait (carte 28). Dans le Sud du golfe, malgré les plages d'accumulation entre les embouchures de la Lielupe et de la Gauja, le littoral a aussi subi une plus forte activité des processus d'érosion dans les années 1990 avec un retrait important de la côte de l'ordre de 1 à 2 m / an pour le Cap Kaugurs (Ouest de Jurmala) et de 1 à 1,5 m/an sur l'embouchure de la Daugava (EuroSION, 2002, 9). La côte Est du golfe ne connaît en revanche qu'une faible érosion de ses falaises.



D'après Eberhards, 2003, modifié

Carte 28 - Évolution du trait de côte dans le Golfe de Riga depuis 1940
 Map 28 - Coastal line evolution in the Gulf of Riga since 1940

Comme les côtes de la Baltique connaissent la prise en glace hivernale de leurs eaux, on peut les considérer comme faisant partie de la famille des littoraux froids de la Terre. On sait que M-L. Byrne et J-C. Dionne (2002, 142) définissent les littoraux froids comme des espaces où les processus de gel, actifs pendant une période de l'année, sont suffisants pour avoir un impact significatif sur les environnements côtiers qu'ils soient marins et terrestres. Or l'étendue des côtes marines affectées par les glaces flottantes représente environ 175 000 kilomètres soit près d'un tiers des littoraux du monde (Dionne, 1972, 7). Donald Forbes et Robert Taylor (1994, 145) précisent plus encore cette définition en proposant que seuls une prise en glace saisonnière ou pérenne, l'action du gel, l'isostasie et les événements postglaciaires tels le rebond isostatique sont les caractéristiques uniques des processus des littoraux froids.

Quoiqu'il en soit, l'érosion notable des côtes lettones du Golfe de Riga incite à se demander quelle est la part du glacial dans le recul du trait de côte. En outre, le processus d'aggradation des plages finlandaises de la Baie de Botnie n'empêche pas une activité glacielle sur ses littoraux. Il convient donc d'en préciser l'ampleur et les processus.

6.2 – LA PART DE L'ACTION DES GLACES DE MER DANS L'ÉROSION LITTORALE EN MER BALTIQUE

L'action des glaces de mer, comme on l'a vu dans le premier chapitre, a fait l'objet de nombreuses contributions surtout publiées en Amérique du Nord. L'abondance des travaux sur les espaces littoraux et lacustres canadiens y témoigne de la prédominance des effets morphologiques des glaces flottantes. Ainsi, l'étude géomorphologique de ces littoraux froids (Forbes et Taylor, 1994 ; Byrne et Dionne, 2002) a permis de décrire et d'analyser l'érosion glacielle estuarienne, notamment pour le Saint-Laurent (Dionne, 1969, 1973a, 1973b), lacustre (Dionne et Laverdière, 1972) et surtout littorale (Héquette, 1986, 1989). J-C. Dionne a ainsi contribué à l'étude de l'action glacielle dans les schorres des littoraux de la Baie de James (1976), puis il a également décrit les formes sédimentaires glacielles des estrans vaseux de la Baie d'Hudson (1985). Michel Allard *et al.* (1998) ont étudié, pour leur part, l'action de la glace d'estran et les processus de gel-dégel dans les sédiments à l'origine d'effondrement et d'affaissement de micro-falaises des littoraux subarctiques canadiens. D'autres littoraux froids ont fait l'objet de travaux tels ceux du Spitsberg (Moign, 1976) et, bien entendu, ceux de la Baltique qui nous concernent particulièrement.

6.2.1 – L'ambivalente activité des glaces de mer : protection et/ou érosion

Les glaces exercent une double activité – de protection et de destruction (Dionne, 1973a, 1). Ainsi, l'effet de la glace sur la côte a souvent été protecteur, empêchant les vagues de modeler la rive, même si certains scientifiques contestent ce point. Les rivages sont ainsi soustraits à l'action directe des agents tels les vagues et les courants. La propagation des vagues dans un couvert de glace marine déconsolidé est très atténuée et « *la nappe glacielle fige le littoral et ralentit considérablement son évolution* » (Dionne, 1972, 15). L'érosion des rivages est ainsi freinée.

En revanche, les glaces exercent également un rôle de destruction pendant les périodes d'embâcle et la débâcle des eaux marines. Sur les côtes de l'Arctique canadien et celles du Saint-Laurent, les glaces flottantes sont de vrais agents érosifs arrachant et transportant le matériel détritique et le déplaçant sur des distances plus ou moins longues. Dans ce sens, J-C. Dionne (1973b, 247) a décrit le rôle important du pied de glace en morpho-sédimentologie littorale comme agent de destruction, de construction et de protection. De manière plus générale, dans leur article traitant de l'effet de la glace sur le littoral et la géomorphologie des côtes froides du globe, D. Forbes et R. Taylor (1994, 61) évoquent bien sûr le rôle protecteur de la banquise face au mouvement des vagues, mais ils mentionnent surtout les déformations engendrées telles les empilements de glace (glace « hummockée », en radeau...) sur les estrans.

La question est de savoir si les glaces de la Baltique exercent une activité morpho-sédimentologique aussi significative que celles décrites pour le Saint-Laurent où l'action abrasive dans les roches meubles est particulièrement développée.

6.2.2 – L'action des glaces de mer sur les littoraux de la Baltique

La littérature scientifique sur l'action érosive des glaces flottantes de la Mer Baltique et leurs effets morpho-sédimentaires est assez limitée en raison de l'absence de marées à fortes amplitudes. Toutefois, les chercheurs finlandais ont contribué aux quelques études menées sur les déformations glacielles près du rivage de la Baie de Botnie (Alestalo et Häikiö, 1976) et du Golfe de Finlande (Mansikkaniemi, 1976). Quelques années plus tard, les mêmes processus ont été étudiés dans la Baltique Propre sur les littoraux de l'Île de Gotland, au Sud-Est de la Suède (Philip, 1990). L'influence des glaces de mer sur les échanges sédimentaires et le transport des galets ont également fait l'objet de rares études menées dans le Sud du Golfe de Botnie (Pyökäri, 1978), dans le Kattegat (Nielsen, 1988) et dans le Golfe de Finlande (Leppäranta *et al.*, 1998).

6.2.2.1 – Les déformations glacielles côtières de la Baie de Botnie et du Golfe de Riga

Au début de l'hiver et au moment de la débâcle printanière, le couvert de glace est instable et vulnérable à toute action physique. Ainsi, de nombreuses déformations de la couche glacielle se manifestent, concernant l'espace côtier. En effet, des empilements de glace se produisent souvent sur la rive ou contre la banquise côtière fixe où la résistance au mouvement est suffisante.

En Baie de Botnie et plus particulièrement sur les littoraux de la région d'Oulu, de tels processus de déformation glacielle ont pu être observés lors de nos missions de terrain. À quelques dizaines de mètres des côtes de Nallikari (Oulu) et de Marjaniemi (Hailuoto), de petits monticules de glace se dressent ainsi autour d'un obstacle rocheux, interrompant la planitude de la banquise côtière. Ces monticules de quelques dizaines de centimètres à un ou deux mètres de hauteur également appelés « pustules » (photographie 13) résultent du soulèvement et du basculement des glaces sous l'action des variations constantes du niveau marin. Elles sont fréquentes près des côtes, se développant à l'emplacement des gros blocs d'estran. En bas estran, il est aussi possible de trouver des déformations de glace empilée et des crêtes de pression (photographie 14). J. Alestalo et J. Häikiö (1976) soulignent que les formes les plus communes dans le Golfe de Botnie sont la glace « hummockée » et en radeau (*rafted*) qui sont le résultat de la banquise comprimée par le vent contre la banquise côtière. Dans le fond du Golfe de Riga, ces mêmes pustules ont été observées sur la côte de Jurmala. Et de volumineux empilements de glace se sont accumulés à Mangalsala formant ce que J-C. Dionne (1973b, 244) qualifie d'ondin glacial (photographie 15).

Les causes de ces déformations glacielles sont de deux ordres : le facteur éolien et les variations mineures du niveau marin, sachant que l'effet des marées est limité en Mer Baltique. En effet, la banquise met fin à l'action des vagues pendant la période hivernale mais au printemps, si le niveau de l'eau monte, il élève la glace : le couvert de glace se brise alors et est poussé par les vents forts contre la côte, où s'accumule de la glace « hummockée » de quelques dizaines à quelques mètres de hauteur. Cependant, la plupart de ces déformations sont essentiellement associées à l'action principale du vent.



Photographie 13 – Pustule développée à l’emplacement d’un bloc d’estran –
Marjaniemi, Hailuoto – Mars 2006

Picture 13 – Ice accumulation on a rock – Marjaniemi, Hailuoto – March 2007



Photographie 14 – Empilement de glace formant une crête de pression – Jurmala – 26 février 2006

Picture 14 – Ridge ice – Jurmala – February 26th 2006



Photographie 15 - La glace « hummockée » et poussée vers la côte Mangalu Pussala (Riga) - 18 mars 2006
Picture 15 - Hummocked ice on Mangalu Pussala coast (Riga) - March 18th 2006



Photographie 16 - Empilement de glace - Hailuoto - 15 mai 2003
Picture 16 - Rafted ice - Hailuoto - May 15th 2003
(Cliché Tommi Lepistö, Bothnian Bay Research Station, University of Oulu)

J. Alestalo et J. Häikiö (1976) ont déjà décrit les processus de déformation de la glace et leurs actions sur la morphologie de la côte de Luodonselkä dans la région d'Oulu. Ils ont signalé le rôle primordial des tempêtes dans la déformation de la banquise puisqu'elles sont capables de la fractionner en blocs de glace et de les faire dériver. Ces auteurs mentionnent qu'au début de l'hiver 1972-1973, trois épisodes cycloniques importants, associés à l'élévation du niveau marin, d'origine atmosphérique, ont permis le détachement de la glace de la côte puis la dérive des blocs de glace vers le Nord-Est. Des dalles de glace ont alors été transportées sur plus de 100 mètres le long de la rive et des hummocks de plus de quatre mètres de hauteur se sont mis en place sur le rivage.

La même année, H. Mansikkaniemi (1976) a également étudié l'influence de la glace de mer sur la côte. Les crêtes de pression de glace se sont accumulées, poussées par le vent contre la rive avec une force jouant un rôle décisif sur la morphologie de la côte. L'auteur en a conclu que sur les côtes à l'abri, c'est-à-dire celles des archipels, ne sont pas exposées à ces phénomènes et que l'action glacielle y est très minime. En revanche, les côtes linéaires plus exposées subissent davantage l'action du vent et ses impacts glaciels. Quand il y a beaucoup de blocs de glace marins, l'influence du vent sur l'érosion du rivage prend une grande importance. De véritables murs de glace hummockée peuvent ainsi s'édifier, atteignant jusqu'à cinq mètres de haut comme celui observé en 2003 à l'extrême Ouest de l'île d'Hailuoto (photographie 16).

Il est possible de retrouver des formes similaires dans le Golfe de Riga lorsque ce dernier est, bien entendu, pris en glace dans son intégralité. La glace alors poussée vers le littoral endommage les côtes sableuses. Cependant, quelle que soit l'importance de ces monticules de glace empilée, cela n'a qu'un impact limité à long terme sur l'évolution morphologique de la côte. En revanche, combinée à d'autres facteurs tels une tempête et les inondations printanières à l'embouchure de la Daugava, la glace peut avoir un impact plus menaçant (EuroSION, 2002, 5). Ainsi, G. Eberhards, spécialiste local de l'érosion des côtes, nous a confirmé, le rôle essentiel des tempêtes de Nord-Ouest et d'Ouest sur la dégradation des côtes lettones (entretien oral du 20 février 2006). Il a précisé que le profil de la côte pouvait ainsi être modifié de quelques mètres en peu de jours. Mais l'abondance des tempêtes hivernales et la moindre présence des glaces de mer dans le Golfe de Riga ces dernières années conduisent à minimiser la part de la glace de mer dans l'érosion littorale de ce secteur. En revanche, une tempête associée à la présence de glace de mer peut entraîner le « hummocking » le long de la côte, tel que nous avons pu l'observer pendant l'hiver 2006 (photographies 14 et 15), protégeant en conséquence le littoral par ces amoncellements de glace. Toutefois, G. Eberhards cite une exception, celle de la tempête du 7 - 9 mars 1989 qui a entraîné la glace de mer vers le rivage érodant notablement les dunes et les falaises en seulement trois jours. Mais ce cas de tempête fut le seul de cette ampleur.

6.2.2.2 - La formation du pied de glace sur le littoral d'Oulu

Lors de la fonte printanière, des blocs de glace de mer se détachent du rivage et il alors possible de voir un pied de glace se former (Guilcher, 1958 ; Dionne, 1973b ; Alestalo et Häikiö, 1976 ; Moign, 1976 ; Nielsen, 1988 ; Allard *et al.*, 1998). Dans sa synthèse sur les diverses définitions du pied de glace données par les scientifiques anglophones et francophones, J-C. Dionne (1973b, 232) définit le pied de glace comme étant « *une frange de glace de largeur variée, en bordure des littoraux des régions froides, entièrement ou partiellement soudée au rivage par le fond ou par le côté et affectée ou non par les mouvements verticaux de la nappe d'eau* ».

Sur les sites de Nallikari et de Toppila (Oulu), des pieds de glace formés au début de la saison glacielle ont pu être observés à l'arrivée du printemps lors du détachement des blocs de glace (photographie 17). Les pieds de glace de plage sont peu épais et uniformes. Ils se forment lorsque les températures sont suffisamment basses pour que l'eau de la faible marée montante commence à geler au contact du sable. Leur formation progressive résulte souvent de slush et de frazil poussés sur la plage par le jet de rive et de petites quantités d'eau prise en glace projetées sur le rivage lors du déferlement des vagues (Dionne, 1973b, 240), processus typique des côtes à très faible coefficient de marée (Nielsen, 1988, 65). Les chutes de neige peuvent renforcer le pied de glace en formation. Le rôle de protection du pied de glace de plage paraît prédominant en Baie de Botnie. Il forme une défense naturelle contre les vagues comme cela avait été noté par A. Moign au Spitzberg (1976, 63).

Au printemps, nous avons pu observer maintes fois à la surface du pied de glace à Nallikari divers modelés liés à la fonte, notamment des fissures et des crevasses (photographie 18). Ils se produisent sous l'effet des mouvements verticaux de la faible marée qui affecte la nappe d'eau sous le pied de glace. D'autre part, nous avons pu constater que ces fissures et crevasses sont souvent parallèles au rivage et que de fréquents regels d'eau dans ces ouvertures ont lieu.

Toutefois malgré sa formation tous les printemps, le pied de glace en Baie de Botnie n'a qu'une action érosive assez limitée contrairement à ceux des côtes du Saint-Laurent, par exemple, qui sont alors de véritables agents d'érosion, de transport et de sédimentation efficaces.



Photographie 17 – Pied de glace avec ouverture d'une crevasse le séparant de la banquise littorale –
Toppila, Oulu – 21 avril 2009

Picture 17 – Ice foot with a lead separating it from coastal fast ice – Toppila, Oulu – April 21st 2009



Photographie 18 – Fissure à la surface du pied de glace – Nallikari – 28 avril 2009

Picture 18 – Crack at the surface of an ice foot – Nallikari, Oulu – April 28th 2009

6.2.2.3 – Le rôle morpho-sédimentaire des glaces de la Mer Baltique

Lors des mouvements occasionnés par les processus de prise en glace et de débâcle, les glaces flottantes peuvent également être des agents de transport et de sédimentation. Certes, la faible amplitude des marées en Mer Baltique ne facilite pas l'action érosive des côtes. Toutefois, les sédiments accumulés dans la couche de glace pendant la saison glacielle sont rejetés dans la mer pendant la fonte printanière. Mais peu d'études estimant la charge détritique de glaces de mer de la Baltique ont été publiées. M. Leppäranta *et al.* (1998, 218) ont toutefois évalué la teneur en sédiments dans les glaces de la Baltique entre 1 et 10 mg / L sachant que les rejets industriels et la pollution maritime participent pour 15% à cette charge. Néanmoins ils n'ont pas évalué la distance parcourue par ces sédiments.

Le déplacement de galets de taille variée sur des distances de quelques dizaines de centimètres voire de quelques mètres est le phénomène le plus observable sur les côtes de la Baltique. Certains scientifiques tels Mauri Pyökari (1978) dans le Sud du Golfe de Botnie et H. Mansikkaniemi (1976) dans le Golfe de Finlande, ont mené l'expérience de marquage des galets afin d'analyser et de mesurer leurs déplacements sur le rivage.

Leurs résultats convergent dans le même sens puisqu'ils ont tous deux remarqué que la glace de mer occasionnait des déplacements de galets sur de très courtes distances, de quelques centimètres voire d'un mètre tout au plus. Alors que dans le Sud du Golfe de Botnie, M. Pyökari (1978, 5) observa que dans 70 % des cas, les galets les plus petits étaient généralement transportés plus loin, H. Mansikkaniemi (1976) montra que la plupart des galets établissaient des mouvements rotatifs et que seulement quelques blocs se déplaçaient.

6.3 – CONCLUSION

Il résulte de nos observations sur les littoraux d'Oulu, d'Hailuoto, de Riga et de Jurmala ainsi que de l'exploitation de la littérature scientifique que le rôle érosif de la banquise sur le littoral est très limité. Les glaces de mer ne semblent pas jouer ici un rôle significatif dans la l'érosion des rivages. Des empilements côtiers de glace s'accumulent certes lors de conditions météomarine difficiles mais ces déformations ne participent que peu à la modification géomorphologique de la côte. D'autre part, les glaces flottantes transportent des sédiments mais pas en quantité suffisamment significative pour modifier de façon importante le bilan sédimentaire des plages. En définition, l'action principale de la banquise en Mer Baltique est surtout de protéger le littoral face aux processus d'érosion habituels de la mer. Plus généralement, il apparaît que les effets des processus glaciels sur les littoraux ne sont pas aussi efficaces sur les côtes à marée de faible amplitude telles celles de la Baltique et de l'Arctique russe, que sur les côtes de l'Arctique canadien.

Partie 3

Les implications sociétales

Chapitre 7

Les populations riveraines face à la présence hivernale de la banquise

- 7.1 - Caractéristiques des populations côtières finlandaises et lettones : les exemples d'Oulu et de Riga
- 7.2 - L' attractivité saisonnière de la banquise
- 7.3 - Les formes d'adaptation sociétale à la banquise
- 7.4 - Conclusion : attractivité de la banquise pour les uns, répulsion pour les autres

Chapitre 8

La navigation hivernale et la banquise

- 8.1 - Classification des navires et restrictions au trafic hivernal
- 8.2 - Les aides à la navigation
- 8.3 - Les mauvaises « fortunes de mer »
- 8.4 - Influence de la navigation sur le couvert de glace

Chapitre 9

La banquise, un risque sociétal ?

- 9.1 - Aléas et vulnérabilité
- 9.2 - La perception du danger
- 9.3 - Les incidents et accidents en mer gelée
- 9.4 - La gestion du risque et de l'accident
- 9.5 - Conclusion

La dureté des conditions hivernales en Mer Baltique a toujours eu une grande influence sur les activités économiques des populations côtières. Dans le passé, toutes les activités maritimes étaient ainsi perturbées voire interrompues. Aussi, les recherches menées sur les glaces de mer de la Baltique ont souvent eu comme objectif premier de répondre aux besoins économiques des pays riverains notamment aux nécessités grandissantes de la navigation maritime. La saison glacielle est la période de l'année qui affecte le plus les populations de la Baltique qui ont dû, depuis des siècles, s'adapter à ces contraintes climatiques nordiques. Leur présence et leurs modes de vie sont déjà largement évoqués sur la carte d'O. Magnus (figure 3) datant du XVI^{ème} siècle.

De nos jours, comment les populations les plus concernées par ces phénomènes de prise en glace de la mer, réagissent-elles face à ces changements environnementaux considérés souvent comme contraignants ? Par ailleurs, les différentes populations de la Baltique ont-elles toutes la même réaction ? Car il faut rappeler que l'économie, l'histoire, la culture de chaque pays riverain de la Baltique sont différents et que les comportements et moeurs de leurs populations face au milieu marin et à sa glaciellisation peuvent en être largement influencés.

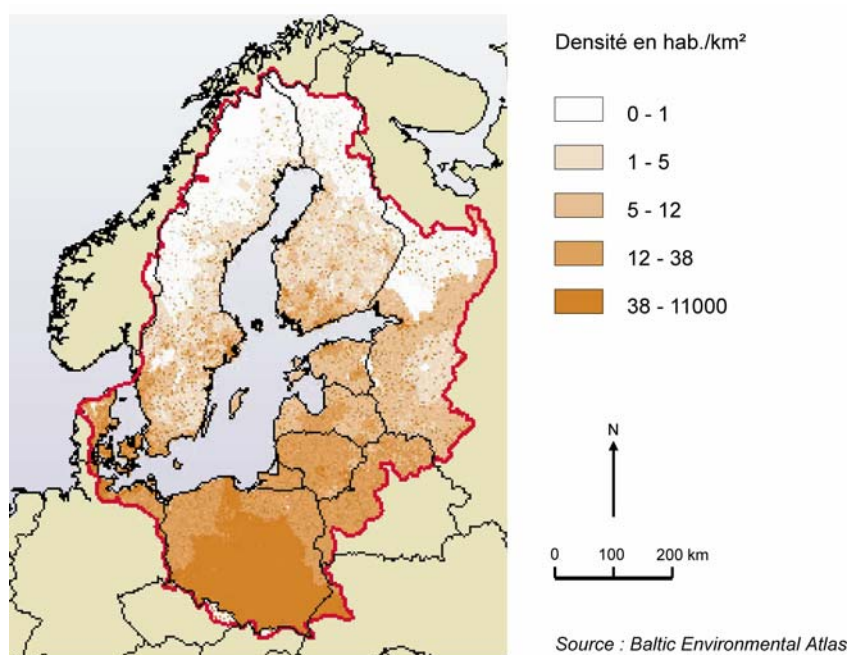
Cette troisième partie s'interroge ainsi sur la plus ou moins forte intensité des relations entre la nature (milieu marin) et les sociétés (finlandaises et lettones) de la Baltique à travers l'étude des glaces de mer, et sur les raisons éventuelles d'une plus ou moins bonne adaptation à cet espace. La perception de cet espace par les populations en tant qu'atout ou contrainte est donc étudiée *via* la réactivité de ces populations face à la présence de la banquise. Un chapitre entier est consacré à la navigation maritime hivernale car cette activité s'est développée en Mer Baltique depuis le Moyen-Âge et que de nombreux ports côtiers ont fait partie de la Ligue hanséatique. Enfin, nous nous interrogerons sur les risques induits par les glaces de mer pour les populations littorales.

Les populations riveraines face à la banquise hivernale

Les rives de la Baltique ont, depuis plusieurs siècles, été très convoitées. Les temps hanséatiques en sont largement témoins puisqu'ils ont vu des villes côtières se développer précocément au Moyen-Âge avec un commerce maritime croissant. De nos jours, les plus grandes agglomérations côtières se concentrent davantage dans la Baltique méridionale avec en tête Saint-Pétersbourg suivi de loin par Stockholm, Gdansk, Helsinki, Riga et bien d'autres. Néanmoins les plus petites villes portuaires du Nord de la Baltique se sont aussi largement développées et les économies suédoises et finlandaises doivent compter sur des villes telles Umeå, Luleå, Oulu, Pori ... Ces disparités Nord-Sud sont l'expression d'une répartition inégale de la population du bassin de la Baltique. En effet, les rives de la Baltique ont une densité de peuplement nettement supérieure sur les côtes méridionales (carte 29). Elles sont certainement, d'un point de vue environnemental, plus attractives que celles plus septentrionales du Golfe de Botnie qui présentent des contraintes naturelles beaucoup plus difficiles.

La glaciellisation de la Mer Baltique en période hivernale en est le facteur primordial : le comportement des sociétés et leur mode vie sont alors saisonnièrement modifiés. Bien entendu, les populations ont su s'adapter à la rudesse du climat et aux conditions marines difficiles mais ce changement d'état de la mer représente une contrainte évidente pour certains. Toutefois, de nos jours, les réactions face à la présence des glaces de mer des populations riveraines de la Baltique sont assez divergentes. Leur propre histoire, l'économie de leur pays, leur culture sont autant d'éléments qui entrent en compte pour y diversifier l'interprétation des résultats.

En prenant l'exemple des populations littorales d'Oulu et de Riga, nous avons ainsi mené une étude sur la mise en valeur de l'espace marin gelé à travers la fréquentation et la diversité des activités humaines ayant un lien direct avec la banquise. Il s'agit ici de constater dans un premier temps les différents comportements des populations finlandaises et lettones face à la glaciellisation de la mer, puis de comprendre la perception qu'elles en ont. En quoi la banquise peut-elle représenter un espace attractif ou au contraire tout à fait contraignant ? Pour répondre à cela, notre étude se base sur des observations faites sur les deux terrains d'étude et sur les nombreux entretiens menés avec les « acteurs » de la banquise.



Carte 29 – Densité de population dans le bassin de la Baltique en 2000
 Map 29 – Population density in the Baltic basin in 2000

7.1 - CARACTERISTIQUES DES POPULATIONS COTIERES FINLANDAISES ET LETTONES : LES EXEMPLES D'OULU ET RIGA

Comme nous l'avons brièvement mentionné en première partie de ce travail, le choix des sociétés finlandaises et lettones a paru intéressant dans la mesure où elles présentent des caractères contrastés de leur histoire, de leur culture et de leur économie.

7.1.1 – Oulu, le technopôle nord finlandais

Bien que se situant à mi-chemin entre les latitudes les plus septentrionale et plus méridionale de la Finlande, la ville d'Oulu est le centre urbain le plus développé du Nord de la Finlande, sachant que le vaste territoire lapon finlandais ne concentre qu'une infime partie de la population du pays. La ville d'Oulu est la capitale de l'Ostrobotnie du Nord, région qui dénombre plus de 365 000 habitants dont le tiers se concentre dans la ville côtière. Sa population est relativement jeune (graphique 25) - 78% de ses habitants ont moins de 55 ans - du fait d'un taux de natalité d'environ 10‰ (Statistics Finland, 2000). L'Ostrobotnie du Nord est composée à 98,9 % de Finlandais, les Suédois et les Russes constituant par ailleurs les deux principales minorités.

D'un point de vue économique, cette région est tournée vers deux secteurs : les services et l'industrie forestière. Un nombre notable de personnes est employé dans le secteur industriel où dominent les usines de pâte à papier. Le taux bas du secteur

primaire correspond pour l'essentiel à la sylviculture et à toute l'activité forestière induite (graphique 27). Cependant, la majorité de la population active travaille dans les services avec une nette prééminence pour le secteur technologique. Ce point n'est pas anodin puisque la région d'Oulu est réputée pour ses activités de haute technologie et la concentration de centres de recherche tournés vers l'informatique et ses applications.

En effet, selon le rapport sur la compétitivité globale du World Economic Forum, la Finlande a été classée seconde économie la plus compétitive en matière d'innovation dans le monde en 2006 (Lépy, 2008, 259). Dans les décennies passées, la Finlande a développé une solide réputation en tant que pionnière dans le développement de la société d'information (Inkinen, 2003, 250), particulièrement avec l'établissement de Nokia qui apparaît comme un leader dans le domaine des télécommunications. Ces dernières années, la Finlande a acquis la réputation d'un des pays les plus avancés en matière de développement de la haute technologie, en particulier pour la téléphonie mobile (Jauhiainen, 2006, 1408). À plus d'un titre, les longues distances et l'isolement géographique d'une partie de la population finlandaise reliés aux contraintes naturelles comme à la rudesse de l'hiver, ont ainsi favorisé l'émergence et le développement des technologies d'information et de communication.

Alors que l'économie classique du Nord de la Finlande repose principalement sur la sylviculture et l'agriculture, la ville d'Oulu se présente comme le centre urbain de la région. Forte de plus de 130 000 habitants en 2007, la ville n'a cessé de croître. Son attraction réside largement sur l'image de « ville technologique » qu'elle a acquis grâce à l'implantation de Nokia dont le principal centre de recherche se situe à Oulu, et le développement d'un « village technologique » proche de l'université où de nombreuses sociétés « high tech » se juxtaposent. Trois quarts des entreprises de recherche et de développement du Nord de la Finlande se concentrent à Oulu (Jauhiainen, 2006, 1413), ce qui lui a valu d'être qualifiée par certains auteurs de « capitale des technologies arctiques » (Lohez, 2001).

7.1.2 – Riga, la capitale lettone où domine la présence russe

La capitale lettone est, quant à elle, une ville cosmopolite du fait de son passé historique. La démographie de la ville de Riga qui recensait plus de 725 000 habitants en 2007, a connu de profonds bouleversements de sa structure. De nos jours, elle est la victime d'une crise démographique à laquelle toute la Lettonie est confrontée avec une croissance négative depuis l'indépendance du pays résultant à la fois d'un faible taux de natalité (base étroite de la pyramide des âges du graphique 26) et d'une forte émigration (départ des Russes après 1991).

Ces départs n'ont toutefois que peu modifié la composition de la population de Riga puisque les Russes y sont majoritaires. En 2000, la ville concentrait près de 44% de

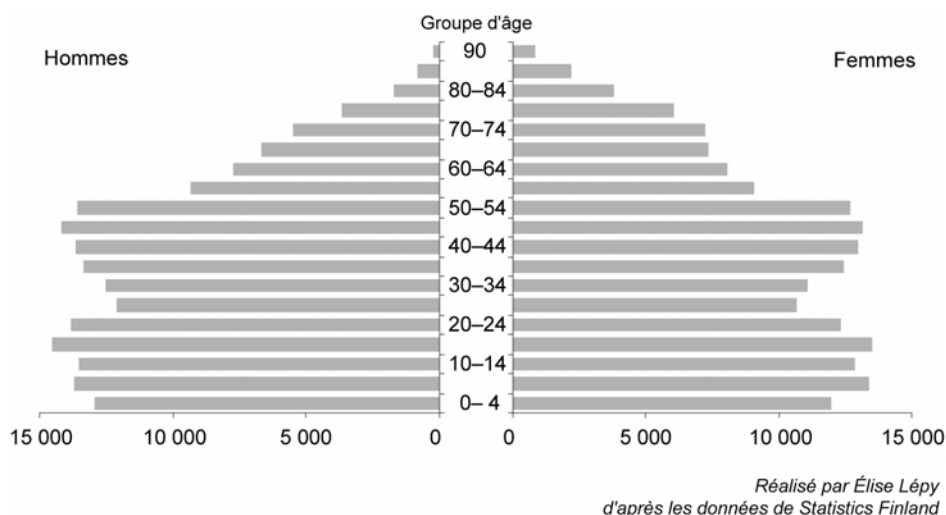
Russes, 41% de Lettons outre des personnes d'autres nationalités, principalement des Biélorusses et des Ukrainiens (à partir des données du Central Statistical Bureau of Latvia). L'empreinte russe est donc encore très marquée d'autant plus que 55% de la population de Riga ont le russe pour langue maternelle (seulement 40,5% le letton). D'autre part, l'influence russe est nettement visible dans la sphère culturelle. Cependant, si la particularité locale se caractérise par la prépondérance indéniable de la composante russe sur les Lettons, la communauté russophone de Lettonie, la plus nombreuse des trois états baltes, devient de plus en plus « balte » (Bacharach, 2006, 70).

Malgré ces difficultés démographiques, l'économie de la Lettonie a connu une croissance spectaculaire depuis le début de la décennie. Les trois quarts de sa croissance sont le fruit de l'amélioration des services notamment dans les secteurs du commerce, des transports et des communications (Bayou, 2006, 23). Les transports sont majoritairement concentrés sur la côte où d'importantes zones portuaires sont installées, en particulier à Ventspils et Riga. Le port de Riga est donc un secteur d'emploi considérable pour la ville. D'autre part, la Lettonie concentre aussi un taux important de personnes employées dans les services. Toutefois le secteur qui prend le plus d'ampleur ces dernières années est le tourisme qui, depuis l'intégration du pays dans l'Union Européenne, ne cesse de s'accroître. Mais cela ne change pas le fait que la Lettonie reste fondamentalement une terre agricole.

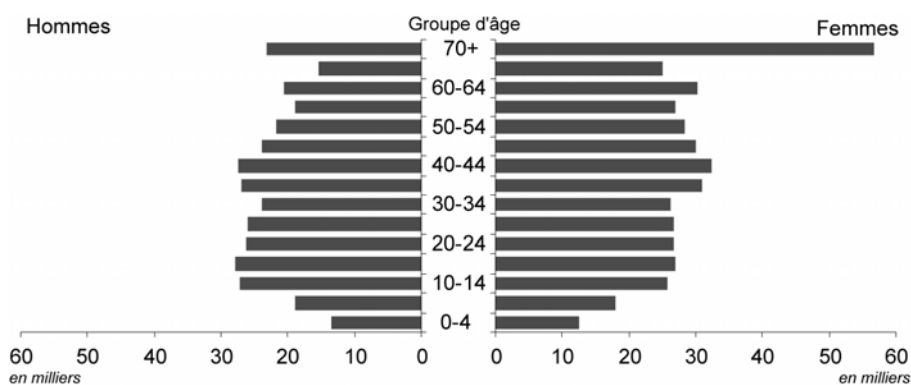
7.2 - L'ATTRACTIVITE SAISONNIERE DE LA BANQUISE

Les observations effectuées sur les littoraux finlandais et lettons ont permis de cerner les formes de l'appropriation de l'espace marin hivernal gelé par les populations locales. Mais ces observations ne permettaient pas, à elles seules, d'analyser la fréquentation de cet espace et ses activités.

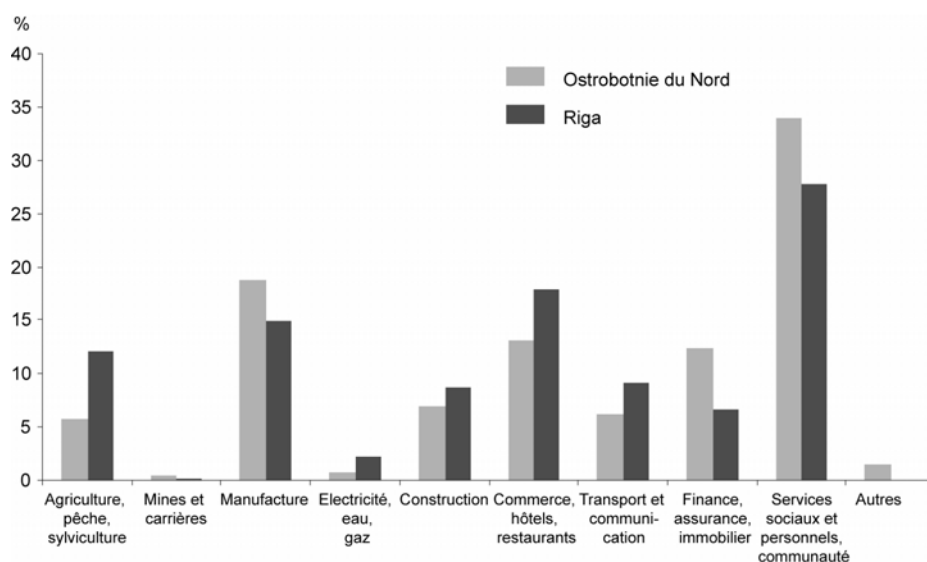
Aussi, il a semblé primordial de mener en plus une enquête sur la « fréquentation de la banquise » et la pratique des activités hivernales menées parallèlement auprès des populations littorales finlandaises et lettones (annexe 10). Bien entendu, cette enquête s'est concentrée sur le littoral d'Oulu (Hailuoto, Oulunsalo, Kempele, Oulu et Haukipudas) pour la Baie de Botnie ; et sur les littoraux de Riga et de Jurmala pour le Golfe de Riga. La mise en place de l'enquête et les difficultés rencontrées ont préalablement été évoquées dans le chapitre méthodologique. Les informations collectées portent, en définitive, sur 105 questionnaires remplis anonymement pour le littoral d'Oulu et 100 pour celui de Riga.



Graphique 25 - Pyramide des âges pour la région d'Ostrobotnie du Nord en 2000
Graph 25 - Population pyramid for Northern Ostrobothnia in 2000



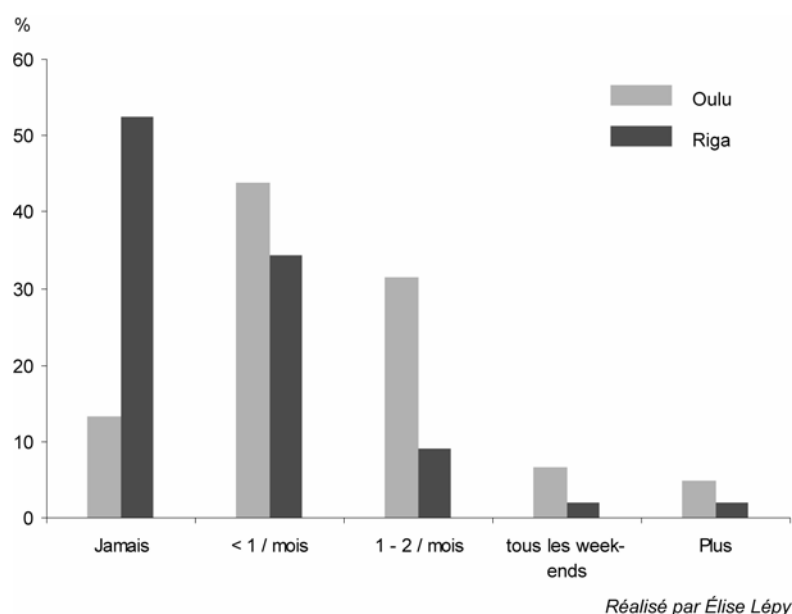
Graphique 26 - Pyramide des âges pour la ville de Riga en 2000
Graph 26 - Population pyramid for Riga city in 2000



Graphique 27 - Répartition de la population d'Ostrobotnie du Nord et de Lettonie par secteur professionnel en 2005
Graph 27- Population distribution of Northern Ostrobothnia and Latvia by professional activities in 2005

L'enquête était destinée aux seuls Finlandais dans le cas d'Oulu dans la mesure où le facteur de curiosité des étrangers pour la glace et la banquise en général, aurait faussé les résultats. Dans le cas letton, le questionnaire a concerné les habitants de Riga et de Jurmala qu'ils soient lettons ou russes.

L'enquête menée auprès des deux populations a porté, dans un premier temps, sur la fréquence de toute forme d'activité pratiquée par les habitants sur la banquise. Les réponses s'y déclinent en cinq catégories « jamais », « inférieur à une fois par mois », « de une à deux fois par mois », « tous les week-ends » et « plus ». Le graphique 28 présente les résultats obtenus du questionnaire.



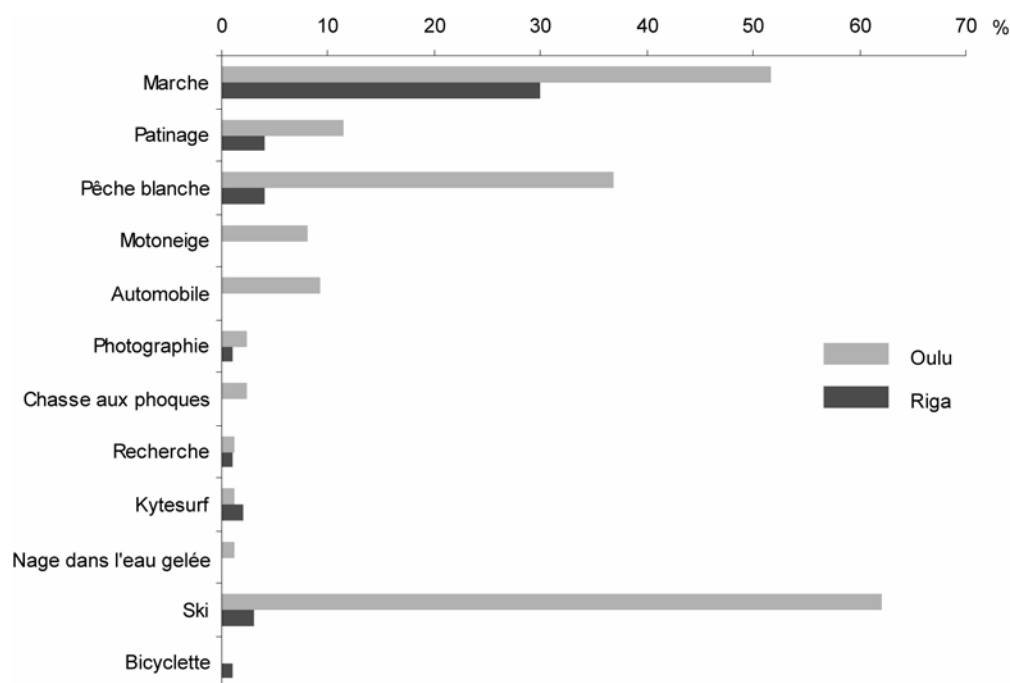
Graphique 28 – Fréquentation de la banquise à Oulu et à Riga
(résultats d'enquête menée auprès de respectivement 105 et 100 personnes)
Graph 28 – Sea ice frequenting at Oulu and Riga
(results from the survey conducted to respectively 105 and 100 persons)

Il paraît flagrant que les deux populations s'opposent en terme de comportement face à la fréquentation des glaces de mer. Alors que plus de 86% des Finlandais fréquentent la banquise au moins une fois pendant la saison glacielle, plus de 46% des personnes interrogées à Riga et à Jurmala n'y pratiquent jamais aucune activité. Cependant, l'interprétation des résultats pour Riga doit faire l'objet de beaucoup d'attention. En effet, lors de notre séjour sur la côte lettone, si nous avons pu à notre grande surprise observer très peu de personnes présentes sur la banquise, une multitude d'entre elles marchait sur la plage enneigée ! Donc il apparaît qu'un certain nombre de personnes répondant qu'ils pratiquaient la marche sur la banquise, ne s'aventurent pas en fait au-delà de la plage. Cette ambiguïté dans la réponse a conduit certainement à une

erreur des pourcentages accordés aux réponses « jamais » et « inférieur à une fois par mois ».

Par ailleurs, dans les deux cas, plus la fréquence augmente, moins il y a de personnes concernées, avec toutefois un pourcentage toujours assez élevé d'habitants d'Oulu – de l'ordre de 31 % - qui pratiquent une activité sur la banquise une à deux fois par mois.

La nature des activités pratiquées sur la banquise s'avère très variable en fonction de la population interrogée. Sur le graphique 29, les résultats concernent les personnes fréquentant la banquise au moins une fois pendant la saison glaciale. Alors que cette question n'était pas dirigée, certaines personnes ont pu mentionner plus d'une activité.



% des personnes parmi celles qui pratiquent une activité sur la banquise et qui ont répondu à cette question soit 87/105 à Oulu et 39/100 à Riga

Réalisé par Élise Lépy

Graphique 29 – Pourcentage de personnes par activité pratiquée sur la banquise
Graph 29 – Percentage of persons by activity in sea ice

La marche est donc l'activité exercée par plus de la moitié des habitants d'Oulu fréquentant la banquise et par 30% de ceux de Riga. Mais l'activité dominante dans le Nord de la Mer Baltique est le « cross-country à ski »²⁶ : plus de 60% de ces personnes

²⁶ Dans les pays nordiques, le « cross-country » est une activité physique qui n'a rien à voir avec la course à pied pratiquée dans nos régions. Il se pratique sur des skis de fond lors de longues randonnées sur les chemins ou la banquise enneigés.

partent ainsi skier sur la banquise côtière de la Baie de Botnie en hiver. La pêche blanche ou pêche sur glace, qui se pratique en creusant un trou dans la glace, est très populaire en Finlande : elle concerne plus de 36% des riverains d'Oulu fréquentant la banquise. D'autres activités intéressant moins de personnes sont encore assez populaires et il est fréquent d'observer des gens faire du patin sur glace dans des zones aménagées, ou encore conduire une motoneige voire une voiture²⁷ sur les routes de glace ouvertes à la circulation. En revanche, les activités exigeant un matériel spécifique comme le kitesurf, ou bien les activités très particulières comme la chasse aux phoques ou la nage dans l'eau glacée ne sont pas accessibles à un grand nombre de personnes. Sur les rives du Golfe de Riga, il est vrai qu'à côté de la promenade dominicale, les habitants exercent très peu d'autres activités : les motoneiges et les voitures roulant sur la glace ne font absolument pas partie du paysage de la banquise lettone et ceci sans doute autant pour des raisons liées au moindre développement économique de cette population que pour son désintérêt pour ces activités de « sports mécaniques ».

Certaines activités sont plus pratiquées que d'autres. Les cartogrammes (figure 12) montrent ainsi la relation entre les activités pratiquées et leur fréquence par rapport au nombre de personnes qui d'une part vont au moins une fois dans l'hiver sur la banquise, et d'autre part ont répondu à la question. Le nombre de cas est précisé à droite du document. Il ressort de la figure 12a trois points concernant le cas d'Oulu :

- tout d'abord les personnes qui fréquentent peu la banquise (inférieur à une fois par mois) pratiquent en priorité la marche. Ceci concerne 57,8% des cas ;
- en revanche, les personnes qui vont sur la banquise une à deux fois par mois voire tous les week-ends y vont généralement pour skier – respectivement 83,3% et 71,4% des cas – et ensuite pour marcher et pêcher (pêche blanche) ;
- enfin, le cinquième de la population passant du temps sur la banquise privilégie la pêche blanche (60% des cas).

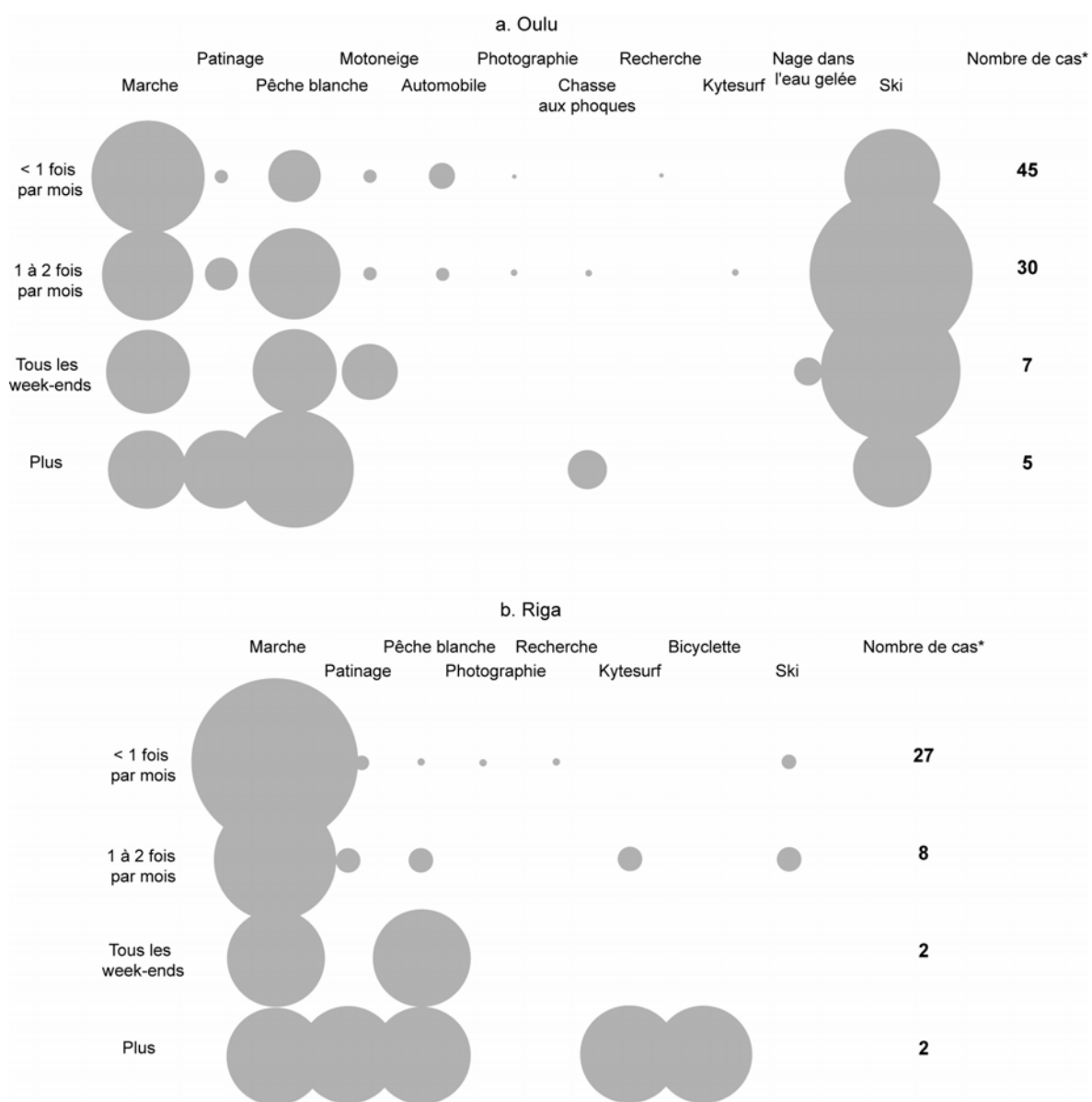
À côté de ces activités, le patinage sur glace et la motoneige sont des activités régulièrement pratiquées. D'autre part, les activités que peu de personnes pratiquent sont alors régulièrement exercées par cette minorité : kitesurf, nage dans l'eau gelée, chasse aux phoques. Ces personnes les pratiquent plus de deux fois par mois.

Concernant l'âge, les personnes de moins de 30 ans ne semblent pas très intéressées par une grande diversité d'activités. Plus de la moitié d'entre elles n'y vont que pour se promener, alors que les personnes de plus de 30 ans pratiquent davantage le cross-country à ski mais aussi la pêche blanche puis la marche. Le patinage et la motoneige sont pratiqués par différentes catégories d'âge.

²⁷ La capacité de la glace à supporter différentes charges en fonction de son épaisseur est décrite en annexe 12.

À Riga (figure 12b), les commentaires sont nécessairement plus succincts : la marche est largement majoritaire quelle que soit la densité de fréquentation de la banquise. Certaines activités, très peu pratiquées comme le kitesurf ou la pêche blanche, sont toutefois – comme à Oulu – exercées régulièrement, plus de deux fois par mois.

Les modes de fréquentation de la banquise sont donc bien représentatifs de l'attractivité des populations pour ce milieu. Il est clair, d'après notre enquête, que les Finlandais exercent davantage d'activités sur le pack de glace que les Lettons. Est ce le signe d'une perception différente de la banquise ? Dans une grande mesure sans doute, mais cela traduit aussi une différence entre les modes de vie et leur niveau économique.



* concerne les personnes qui fréquentent la banquise au moins un fois pendant la saison glaciale et celles qui ont répondu à cette question

Réalisé par Élise Lépy

Figure 12 – Relation entre les activités pratiquées sur la banquise et leur fréquence
Figure 12 – Relation between activities on sea ice and their frequency

7.3 – LES FORMES D’ADAPTATION SOCIETALE A LA BANQUISE

La question de la glaciellisation de la Mer Baltique pourrait conduire à l’image préconçue d’un arrêt total de toute activité liée au milieu marin. En fait, il n’en est rien car l’homme s’est adapté depuis fort longtemps à la banquise par ses pratiques traditionnelles. Par ailleurs, plus récemment, avec le développement de la technologie, l’homme a développé de nouvelles pratiques s’adaptant à cette modification saisonnière de l’espace marin.

7.3.1 – Hivernalisation des activités pratiquées en mer libre de glace

L’hiver arrivant, les activités maritimes peuvent soit s’arrêter soit s’adapter saisonnièrement au nouveau milieu. Il est vrai que, depuis assez longtemps mais aussi plus récemment avec le développement technologique croissant, on a vu apparaître une sorte d’hivernalisation de certaines activités. L’activité la plus économiquement importante qui se poursuit tout au long de l’année en Mer Baltique est la navigation maritime. Or cette hivernalisation de la navigation dans les glaces de mer n’a lieu que depuis quatre décennies dans les eaux septentrionales du Golfe de Botnie. Le prochain chapitre sera totalement consacré à cette question de la navigation hivernale qui tient une part importante dans l’économie des pays riverains de la Baltique.

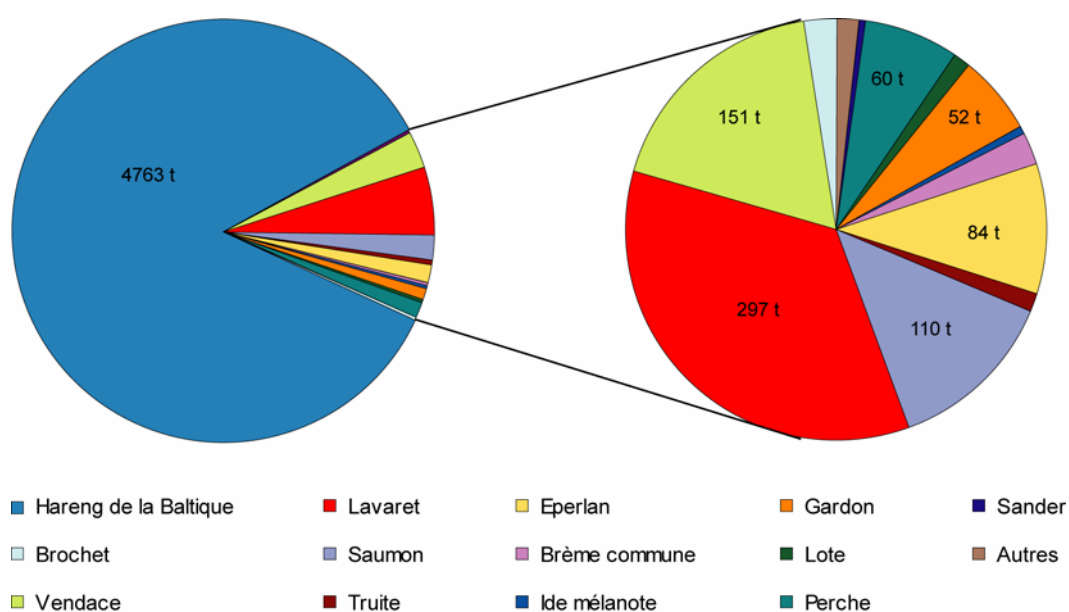
D’autre part, les observations faites lors de nos missions ont révélé deux types d’activités qui se sont bien adaptées à la présence de la banquise : la pêche et les sports sur l’eau. En effet, la glaciellisation des eaux marines n’interdit pas la vie des animaux aquatiques sous la couche de glace. Dès lors la pêche est depuis très longtemps pratiquée par des trous creusés dans la banquise. Parmi les sports sur l’eau habituellement pratiqués en mer libre, certains peuvent aussi être exercés sur la banquise. À titre d’exemple, on va voir que le kitesurf sur glace est, de nos jours, de plus en plus populaire sur la banquise côtière de la Baie de Botnie.

7.3.1.1 *La pêche en mer*

La pêche en mer est une activité très développée en Mer Baltique (Chaussade et Corlay, 1990) actuellement au cœur de nombreux débats, notamment celui du déséquilibre de l’écosystème marin. En 2005, la pêche maritime professionnelle représentait plus de 80% de l’activité totale contre 7% pour la pêche de loisirs et plus de 10% pour l’aquaculture (Nylander, 2006).

De par sa faible teneur en sel, la Mer Baltique détient plus de stocks de poissons d’eau douce comme le brochet, la brème commune, la perche, le gardon... Toutefois, le hareng de la Baltique est le poisson le plus capturé comme en Baie de Botnie où les

pêcheurs professionnels finlandais ont pêché plus de 4700 tonnes de harengs en 2005 (figure 13). De façon moins importante, le lavaret, le saumon et le vendace constituent des captures non négligeables suivies de l'éperlan, du gardon et de la perche. Dans le Golfe de Riga, les pêcheurs professionnels lettons ont, eux aussi, capturé une quantité importante de harengs, soit 19755 tonnes, en 2005. Les ressources en poissons semblent moins diversifiées dans le Golfe de Riga que dans la Baie de Botnie mais 3590 tonnes de sprats, 50 tonnes de flets et quelques saumons (4 tonnes) y ont été pêchés la même année. Malgré ces chiffres, le nombre total de captures est en constante baisse depuis les années 1990 dans les deux cas (Nylander, 2006 ; Latvian Fisheries Marketing and Information Centre), ce qui traduit sans doute, à l'échelle de la Baltique, un problème de diminution des stocks de poissons comme dans la plupart des domaines maritimes du monde (Couliou, 2006 ; Forest, 2006). Ceci s'est traduit, bien entendu, par une baisse des effectifs des professionnels de la pêche en mer. On comptait ainsi près de 5000 pêcheurs professionnels finlandais en 1980, ils n'étaient plus qu'un peu plus de 2200 en 2005 (Nylander, 2006, 7).



Réalisé par Élise Lépy
d'après Nylander, 2006

Figure 13 – Les captures des pêcheurs finlandais professionnels en Baie de Botnie en 2005
Figure 13 – Fish catches by finnish professional fishermen in the Bay of Bothnia in 2005

Bien entendu, les conditions hivernales et la formation de la banquise modifient les pratiques de la pêche en mer. Il n'est alors plus question de se déplacer en bateau et de capturer les mêmes quantités de poissons. Mais l'exploitation de la mer ne cesse pas pour autant. Les professionnels de la pêche maritime en eau libre modifient leurs pratiques et leurs comportements pour la pêche sur glace.

7.3.1.1.1 La pêche sur glace

La pêche sur glace ou encore pêche « blanche » tire ce qualificatif du Québec où cette activité, considérée comme sportive, est très pratiquée. Cette activité hivernale également très populaire chez les Finlandais l'est moins chez les Lettons. En Finlande, la pêche blanche se pratique aussi bien sur les lacs que sur la mer, alors qu'en Lettonie, plus de gens la pratiquent sur les rivières et les lacs. En 2006, lors d'un de nos séjours, bien que le Golfe de Riga ait été totalement gelé et que l'épaisseur de la banquise fût bien suffisante, seul un pêcheur était présent sur la banquise, alors qu'une quantité importante de pêcheurs s'agglutinait sur le fleuve Daugava (photographies 19) dans le secteur portuaire proche du ferry reliant Riga à Stockholm. De manière évidente, ces hommes, solitaires, pêchaient certainement plus par nécessité vitale que pour leur loisir.



Photographies 19 – Pêcheurs sur glace

À gauche, sur la banquise côtière, Jurmala, 26 février 2006

À droite, sur les glaces fluviales de la Daugava, Riga – 26 mars 2006

Pictures 19 – Ice fishermen on ice

On the left, on fast ice, Jurmala, February 26th 2006

On the right, on Daugava River, Riga – March 26th 2006

En Baie de Botnie, les comportements diffèrent et il est fréquent de voir des familles entières aller creuser des trous loin sur la banquise pour pêcher le poisson (photographie 20). Le trou se fait à l'aide d'une tarière à glace qui permet de creuser dans plusieurs dizaines de centimètres d'épaisseur. Les amateurs se munissent alors de mini-cannes à pêche de quelques vingt centimètres de long avec une ligne au bout de laquelle un hameçon est accroché. La récolte n'est pas toujours abondante mais le plaisir est là. Dans ce cas, l'activité hivernale répond évidemment à un loisir pratiqué en famille ou entre amis pour se détendre lors des belles et froides journées d'hiver. D'après notre enquête, 36% des personnes pratiquant une activité sur la banquise à Oulu vont, de temps à autre, pêcher sur la glace.



Photographie 20 – Pêche sur la banquise côtière, Nallikari, Oulu – Mars 2007
 Picture 20 – Ice fishing on sea ice, Nallikari, Oulu – March 2007

À côté de ce type de pêche que l'on pourrait qualifier d'« amateur », certaines personnes pratiquent aussi une pêche blanche professionnelle. Tout comme la pêche en eau libre, elle nécessite l'installation de filets de pêche. Lors de notre mission de 2007, nous avons eu l'opportunité d'intégrer un groupe de trois pêcheurs semi-professionnels qui pratiquent leur activité à quelques kilomètres au Nord d'Oulu.

Point témoignage 2 : La pêche blanche avec des pêcheurs semi-professionnels

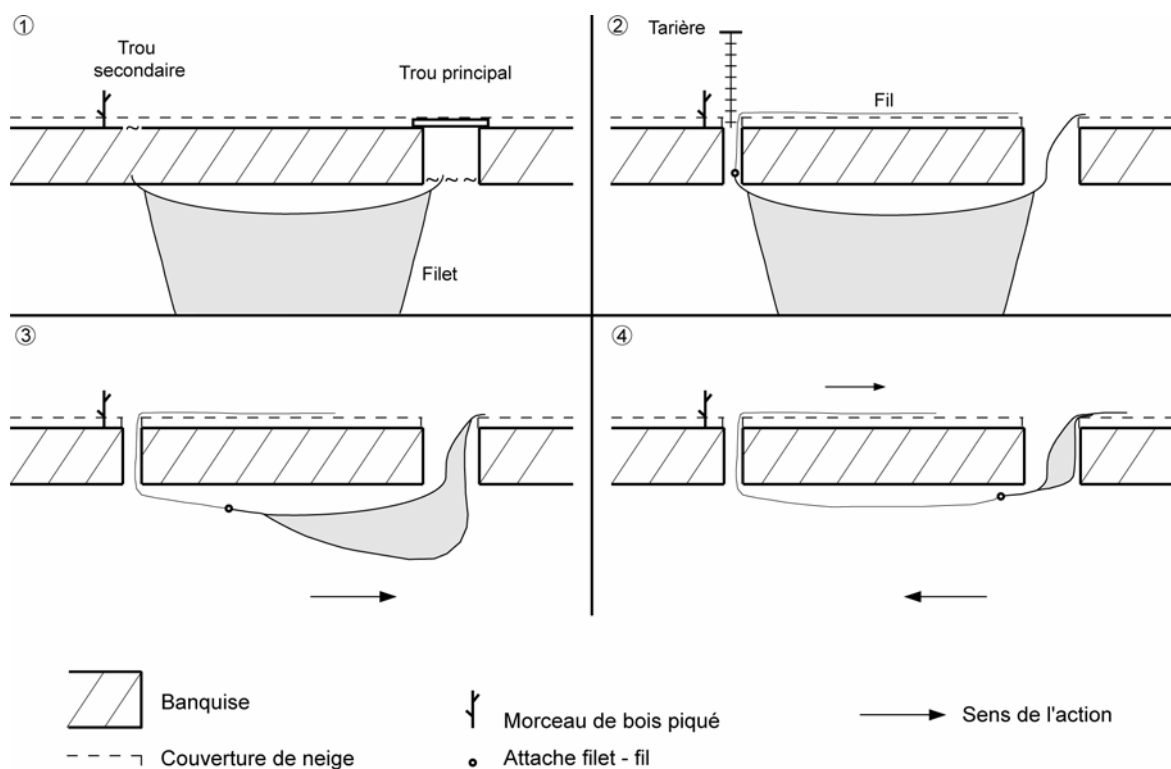
Nous avons rendez-vous ce samedi 10 mars 2007 à 10 heures à la station service de Haukipudas à une quinzaine de kilomètres au Nord d'Oulu. Les pêcheurs m'attendaient patientant à côté de leurs motoneiges. Le Lieutenant Markku Kohonen de la garde côtière fit de rapides présentations et je partis dans une pièce de la station me vêtir de vêtements chauds et adéquats pour affronter les dures températures de la journée et la tempête de neige qui s'annonçait. En réalité la température moyenne avoisinait 0°C mais le vent était tel que la température ressentie était beaucoup plus froide. Les trois hommes étaient des pêcheurs semi-professionnels. On emploie ainsi cet adjectif car, dans les faits, leurs méthodes de pêche sont similaires à celles des professionnels, excepté qu'ils pratiquent cette activité à des fins personnelles et non commerciales. La pêche blanche se révèle être un hobby qu'ils exercent pendant leur temps libre depuis une vingtaine d'années.

À 10 heures 15, le départ pour la mer gelée est annoncé. Nous embarquons à bord de deux motoneiges équipées de traineaux à l'arrière, transportant le matériel nécessaire. Pour rejoindre la banquise de mer, nous empruntons les glaces fluviales de la rivière Kiiminki. De manière un peu étonnante, nous croisons sur notre chemin des panneaux de signalisation indiquant la vitesse à respecter. Mais en arrivant sur la banquise côtière, l'immensité de cet espace blanc se présente à nous et nous sommes libres de l'occuper librement. Nous poursuivons notre route en direction du large jusqu'à la rencontre de l'emplacement des filets de pêche installés précédemment. Le temps est mauvais, les précipitations neigeuses sont abondantes et un vent d'Est souffle fort. À un certain point, il est difficile de délimiter le ciel de la banquise, les côtes ont disparu de notre champ visuel, il est alors indispensable d'utiliser le GPS dont les motoneiges sont équipées pour se diriger. Quelques heures plus tard, un des pêcheurs me confessa que nous avions pris certains risques...

L'emplacement choisi par les pêcheurs se situe approximativement à cinq kilomètres des côtes, aux coordonnées 65° 11' 16'' N ; 25° 09' 83'' E (carte 30). Ils viennent une fois par semaine, en général le week-end, pour ramasser leur pêche et vérifier l'état des filets. Tout l'hiver, ils conservent le même emplacement pour une durée variable selon les conditions glacielles. Cette année là, la saison commença à la fin du mois de Janvier, quelques semaines plus tard que la normale. Ce jour-là, la banquise est compacte d'une épaisseur d'environ 65 centimètres et recouverte d'un manteau neigeux épais de 30 centimètres.

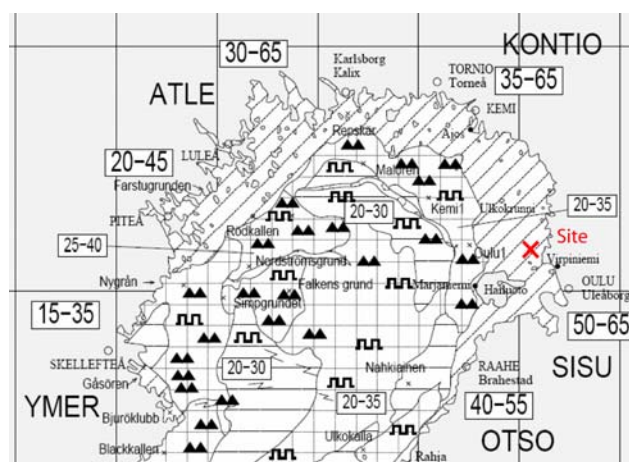
La pêche blanche professionnelle s'organise de la façon suivante : les filets partent tous d'un même trou principal recouvert par une planche de bois et de la neige (rôle isolant) afin d'éviter le regel trop rapide de l'eau. À plusieurs dizaines de mètres du trou principal, il est possible de noter quatre morceaux de bois piqués dans la neige. Ils indiquent l'endroit approximatif de l'autre extrémité de ces filets (figure 14, 1). Les pêcheurs ont six filets d'une trentaine de mètres de long installés dans des directions différentes. La première chose à faire en arrivant sur place est de sortir les filets et de ramasser les poissons piégés. Les filets sont hissés par le trou principal. Mais avant de sortir le filet, un des pêcheurs doit se rendre à l'autre extrémité indiqué par le morceau de bois, y creuser un trou avec une tarière à glace (figure 14, 2) et attraper l'autre extrémité du filet qu'il lie à une corde (photographies 21). Du trou principal, l'extraction du filet de l'eau peut alors commencer et les pêcheurs récoltent les poissons piégés (figure 14, 3). Dans cette région de la Baltique, la plupart des poissons sont des harengs de la Baltique, des perches, des lavarets, des éperlans... Ce jour, la pêche n'est pas miraculeuse... Les vents et courants d'Est transportent l'eau vers l'Ouest et la nourriture se fait alors rare pour les poissons qui migrent dans la même direction. Les pêcheurs attendent les flux de Sud pour les semaines à venir. La remise des filets dans l'eau se fait

aisément puisqu'il suffit de tirer la corde à laquelle l'extrémité du filet a été attachée pour remettre le filet dans l'eau (figure 14, 4). Les pêcheurs m'expliquent toutefois comment se fait la première mise en place d'un filet. Après avoir creusé le trou principal, ils y plongent une longue planche de bois, attachée à une corde, qui va flotter sur l'eau sous la glace et se déplacer avec les courants. Les pêcheurs suivent le trajet parcouru par la planche en écoutant son claquement contre le fond de la couche de glace. Quand ils jugent la distance suffisante, ils creusent un trou et récupèrent la planche. Le filet peut alors être installé. Une fois les explications données tant bien que mal en anglais, en finnois et en gestuel, les pêcheurs décident de repartir en raison des conditions météorologiques qui deviennent de plus en plus difficiles. C'est donc après être restés deux heures sur la banquise que nous repartons vers la côte et que j'ai le plaisir de conduire la motoneige...



Réalisé par Élise Lépy

Figure 14 - La pêche sur glace professionnelle
Figure 14 - Professional ice fishing



Carte 30 - Localisation du site de pêche de l'hiver 2007
Map 30 - Location of the ice fishing spot in winter 2007



Photographies 21 - Les différents stades de la pêche sur glace professionnelle

- a. Mise à l'eau du filet à l'aide de la planche à partir du trou principal ; b. Distance entre le second trou et le trou principal ;
c. Collecte des poissons pris dans le filet ; d. Rangement du matériel

Pictures 21 - Different stages of the professional ice fishing

- a. Launching of the net in the water from the main hole ; b. Distance between the second hole and the main one ;
c. Catching of fishes from the net ; d. Material fixed

7.3.1.1.2 L'aquaculture côtière

L'aquaculture est également très développée en Mer Baltique avec l'abondance des fermes piscicoles qui, dans ce cas-ci, élèvent les poissons en eau de mer. La pisciculture marine tout comme la pêche est plus développée dans les eaux côtières de l'archipel finlandais. Ainsi, en 2005, 9379 tonnes de poissons y ont été produites contre 794 tonnes sur les côtes méridionales de la Finlande, 1144 tonnes sur les côtes de la Mer de Botnie et 686 tonnes sur celles de la Baie de Botnie. Ces fermes piscicoles produisent principalement des truites arc-en-ciel, des lavarets et des saumons dans des cages en filet géantes (Finnish Game and Fisheries Research Institute, 2006).

La Lettonie, quant à elle, compte seulement sept fermes piscicoles dont la production s'est effondrée après l'indépendance du pays. Ainsi, en 1989 elles ont produit 6288 tonnes de poissons, 325 tonnes en 2000 et 729 tonnes en 2007 (FAO), la plupart étant des carpes.

Le problème de la présence de la banquise intéresse davantage la Finlande que la Lettonie. Ainsi, les stratégies des fermes piscicoles pour faire face à la présence des glaces de mer varient en fonction des possibilités de chaque lieu d'élevage. Il faut ainsi prendre en compte les licences, la localisation des lieux d'élevage, leur environnement et les stratégies et pratiques des fermes. Selon leur permis, les exploitants peuvent avoir plusieurs lieux d'élevage de poissons utilisés à différentes saisons. Pendant la saison des glaces, les cages en filet doivent être alors placées aux endroits les plus favorables pour l'élevage. Si l'exploitant dispose d'un site protégé des vents et des pressions exercées par la glace, il est alors possible de travailler toute l'année en entretenant les cages même en présence de la banquise. Les exploitants utilisent généralement des générateurs de flux pour empêcher la glace de se former dans et autour de la cage. Il est ainsi possible de vider les cages et de passer au traitement et à la vente du poisson pendant l'hiver. En général, les cages sont situées non loin des lieux de traitement.

En revanche, si les fermes piscicoles ne bénéficient pas d'endroits favorables à l'élevage de poissons à cause des conditions glacielles, alors elles sont vidées avant que le couvert de glace ne se forme. Mais les enjeux financiers peuvent être importants. En effet, si les cages sont vidées avant l'hiver, le cours du poisson peut alors diminuer car une grande quantité se retrouve sur le marché en même temps. Mais si les fermes piscicoles fonctionnent pendant l'hiver, la vente se fait alors à un prix plus élevé.

7.3.1.2 – Le kitesurf sur glace

Le kitesurf sur glace²⁸ ou encore appelé kitesnowboarding par ses pratiquants est un sport « de glisse » encore peu répandu mais qui tend à devenir de plus en plus populaire en Mer Baltique. L'hivernalisation de ce sport s'est faite dans les années 2000 après que la version estivale de ce sport aquatique soit devenue très populaire ailleurs en Europe. On le connaît bien l'été, mais l'hiver il est toutefois plus difficile d'imaginer une pratique similaire sur la banquise.

Jamais observé en Lettonie, il n'en est pas moins pratiqué, certes par un nombre restreint de sportifs, sur les eaux gelées du Golfe de Riga, selon notre enquête. En revanche sur les littoraux finlandais du Golfe de Botnie, les kitesurfers se font de plus en plus nombreux chaque hiver (photographies 22). L'entretien mené pendant l'hiver 2007 avec Jarkko Seppä, lui-même kitesurfer sur glace, nous a éclairée sur quelques points.

Comme pour toute autre activité pratiquée sur la banquise, une bonne connaissance du milieu est indispensable pour y faire ce sport. Certaines caractéristiques glacielles telles l'épaisseur du couvert de glace, sa fragilité (glace molle ou dure), la présence de déformations et de chenaux ouverts sont à contrôler ainsi que les conditions météorologiques. D'autant plus que ce sport requiert des conditions éoliennes favorables. En effet, le kitesurf sur glace nécessite un vent d'une vitesse minimale de 3 à 4 mètres par seconde. La limite supérieure acceptable est de l'ordre de 12 à 13 mètres par seconde. Pour réaliser des sauts et autres figures qui font décoller la planche de la glace, un vent de 5 à 6 mètres par seconde est nécessaire. Le littoral d'Oulu offre une quantité de « spots » pour les kitesurfers qui les choisissent en fonction de la direction et de la vitesse du paramètre éolien. La température de l'air est également à prendre en considération. Effectivement, les températures négatives peuvent être difficiles à supporter d'autant plus que le vent est fort. Le pouvoir de refroidissement du vent a des effets incontestables sur les températures ressenties. Par exemple, si la température de l'air est de -15°C et le vent souffle à une vitesse de 7 mètres par seconde, le ressenti sur la peau est alors proche de -25°C (annexe 11). Un équipement adapté aux conditions météorologiques et glacielles est donc grandement requis. Par ailleurs, le port du casque est indispensable pour prévenir d'une éventuelle chute sur la glace ainsi que les protections au niveau des articulations. Le matériel utilisé est le même qu'en période estivale, mais il existe désormais des voiles adaptées aux contraintes météorologiques hivernales.

D'autre part, la courte durée du jour en plein coeur de l'hiver, ne permet aux sportifs de pratiquer le kitesurf que quelques heures. Dès le mois de mars, le rallongement de la durée du jour rend la pratique de ce sport beaucoup plus régulière.

²⁸ Le kitesurf sur glace est un sport « de glisse » où la planche du surfeur est tractée par une voile de type parapente

Les risques de ce sport sont multiples. Au-delà des précautions à prendre face aux températures et aux conditions glacielles, il est grandement conseillé de pratiquer ce sport en groupe et non individuellement. J. Seppä cite l'anecdote, il y a quelques années, d'un kitesurfer qui, en effectuant un mauvais atterrissage à quelques kilomètres de la côte, s'est cassé une jambe. Il pratiquait ce sport tout seul et personne ne savait qu'il était là-bas. Heureusement, son téléphone mobile lui a permis d'appeler des secours et d'éviter une hypothermie fatale. Les risques de ce sport « extrême » sont donc bien réels.



Photographies 22 – Kitesurfers sur la banquise ; à gauche, Jarkko Seppä, Nallikari, Oulu – 17 mars 2007 ; à droite, Limingantulli, Oulu – 14 mars 2009

Pictures 22 – Kitesurfers on sea ice ; on the left, Jarkko Seppä, Nallikari, Oulu – March 17th 2007 ; on the right, Limingantulli, Oulu, March 14th 2009

7.3.2 – Un espace marin « continentalisé »

La glaciellisation de l'espace marin a pour conséquence la disparition visuelle du trait de côte séparant la mer de la terre. Ce nouvel espace saisonnier ne distingue plus le domaine marin du domaine terrestre pour ne faire plus qu'un. En effet, un même manteau neigeux recouvre la glace marine de l'un et les espaces ruraux ou urbanisés de l'autre. Ce changement saisonnier a donc pour effet la continentalisation de l'espace marin d'un point de vue physique, ce qui a pour conséquence la pratique d'activités terrestres sur la mer. Cela se traduit de fait par un prolongement voire un déplacement spatial saisonnier d'activités pratiquées sur la terre ferme vers l'espace marin pris en glace (Lépy, 2008, 260). Ce processus concerne essentiellement le cas d'Oulu puisque peu de Lettons ne pratiquent d'autres activités sur la banquise que la marche. Les activités qui répondent à cette continentalisation de l'espace marin sont majoritairement le ski de fond, le patinage sur glace et la conduite de motoneige. D'autre part, l'ouverture de routes sur glace avec la présence d'une signalisation adéquate pour les automobiles est une bonne illustration de ce processus.

Pratiqué par plus de 60% des Finlandais interrogés fréquentant la banquise, le ski (dont le « cross-country ») est une activité très populaire dans le Nord de la Finlande. La semaine, il n'est pas rare de voir des personnes skier pour se rendre sur leur lieu de travail. Le week-end, dans le but de changer leur environnement, les Finlandais vont aussi sur la banquise et partent skier pour des durées plus ou moins longues (photographie 23). Certaines personnes organisent même des excursions de quelques jours à ski et campent sur la banquise. Le ski de fond apparaît donc comme un loisir que la plupart des Finlandais quel que soit l'âge, ont déjà expérimenté.

Plus surprenant, le patinage sur glace a lieu aussi de plus en plus actuellement sur la banquise. Ce sport nécessite toutefois un aménagement spécial puisque le manteau neigeux doit être retiré pour pouvoir le pratiquer à même la surface de la glace de mer. Ainsi, Oulu a aménagé une patinoire en face de la plage de Nallikari formant un grand espace rectangulaire dépourvu de neige sur la banquise. Elle a également ouvert une piste sur glace de plus de six kilomètres à Limingantulli qui permet aux patineurs de se promener dans la baie de Kempele (photographie 25). L'aménagement de ces deux espaces se révèle être un succès étant donné la fréquentation importante.

Également très populaire dans les pays nordiques, l'utilisation de motoneiges permet des déplacements rapides autant sur la terre que sur la banquise (photographie 24). Les garde-côtes ont ainsi remarqué ces dernières années que davantage de motoneiges circulent sur la banquise et que de plus en plus de courses y ont lieu. Aux endroits les plus fréquentés de la banquise, souvent près des embouchures des cours d'eau, des panneaux de signalisation doivent d'ailleurs réglementer la circulation des usagers en motoneige ou à ski. D'autre part, la motoneige est le moyen d'attraction qui a permis à certaines organisations touristiques de mettre en place de véritables « safaris » sur la banquise.

Enfin, l'exemple illustrant le mieux les effets de la continentalisation de l'espace marin est sans aucun doute la possibilité offerte à tous de conduire une automobile sur la banquise. Dans la Baie de Botnie, la circulation y est parfois réglementée entre autre par l'existence de routes sur glace balisées de panneaux de signalisation comme la route joignant la péninsule d'Oulunsalo à l'île d'Hailuoto (photographie 26) ouverte par les autorités dès que l'épaisseur de la couche de glace est supérieure à quarante centimètres. La route sur glace est parfois préférée à la route terrestre puisqu'elle rend l'accès à certains points plus rapide. Cependant, tous les hivers, certains automobilistes ne respectent pas la règle et provoquent des accidents dont les effets peuvent être graves quand l'automobile crève la couche de glace.



Photographie 23 – Skieurs sur la banquise, Nallikari, Oulu – Mars 2007
Picture 23 – Skiers on sea ice, Nallikari, Oulu – March 2007



Photographie 24 – Motoneiges sur la banquise côtière, Nallikari, Oulu – 22 février 2009
Picture 24 – Snowmobiles on the fast ice, Nallikari, Oulu – February 22nd 2009



Photographie 25 – Patineurs sur la banquise, Limingantulli, Oulu – 14 mars 2009
Picture 25 – Ice skaters on sea ice, Limingantulli, Oulu, March 14th 2009



Photographies 26 – La route sur glace de Hailuoto à Oulunsalo – 22 mars 2008
Pictures 26 – Ice road from Hailuoto to Oulunsalo – March 22nd 2008

7.3.3 – Des conditions hivernales qui favorisent certaines pratiques ancestrales : le cas de la chasse aux phoques

La chasse aux phoques est une activité hivernale qui compte peu de pratiquants mais qui existe depuis des siècles comme en témoignent les illustrations de la carte d'O. Magnus (figure 3) du Golfe de Botnie. Elle est un bon exemple d'activité hivernale qui ne peut être exercée qu'à des endroits très précis de la Mer Baltique, là où ces animaux peuvent être aperçus sur les glaces de mer.

De nos jours, la question des phoques de la Baltique est au cœur de nombreux et vifs débats, entre les pêcheurs qui voient avec colère leurs fermes aquatiques se vider après la détérioration des filets de pêche par les phoques, et les défenseurs de ces animaux qui au nom de principes « écologistes » veulent absolument les protéger. Deux principales espèces vivent en Mer Baltique, les phoques annelés (*Phoca hispida*) et les phoques gris (*Halichoerus grypus*).

Alors que le phoque annelé a été la première espèce à se disperser dans le bassin de la Baltique après la dernière grande déglaciation (9500 BP) et qu'il était une espèce commune dans le Nord de la Baltique, le phoque gris, lui, se faisait plus rare (Ukkonen, 2002, 199). Mais de nos jours, les récentes études rapportent des observations contraires. En effet, le phoque annelé de la Baltique est devenu vulnérable et a vu son nombre d'individus se réduire considérablement jusque dans les années 1970. Mais depuis sa population augmente de près de 5% chaque année. On compte désormais près de 4 000 phoques annelés dans le Golfe de Botnie, 1400 dans le Golfe de Riga et près de 300 dans le Golfe de Finlande (HelCom).

Face à cette population assez réduite, celle des phoques gris ne cesse d'augmenter à grande vitesse recensant plus de 17600 individus en 2004 dont plus de 43% se situent dans la Mer d'Archipel et plus de 7,5% dans la Baie de Botnie (Halkka et al., 2005, 16). Les phoques annelés vivent principalement sur la banquise des parties les plus septentrionales de la Baltique. Ils sont capables de maintenir ouverts les trous dans la glace tout l'hiver même sous des températures très froides. Cette espèce est solitaire contrairement au phoque gris qui est grégaire. Le phoque gris se répartit quant à lui en général le long de la limite des glaces de mer là où l'eau libre de glace est apparente. Cette espèce pélagique n'a, en effet, pas la capacité de se déplacer à travers les trous étroits creusés dans la banquise.

L'actuel problème en Mer Baltique est donc le conflit persistant qui existe entre les défenseurs des droits des animaux qui veulent protéger ces espèces et les pêcheurs qui voient leur production se réduire et leur matériel se dégrader. En effet, il a été constaté un nombre important de filets de pêche endommagés par les phoques. Les principales pertes regroupent les populations des élevages piscicoles tuées ou blessées, et parfois même échappées des cages. En 2003, la perte de poissons élevés et le matériel détérioré dans les eaux finlandaises ont engendré un coût de près d'un million d'euros (Moilanen et al.,

2005, 41). Le chasseur de phoques Jouni Heinikoski, lors d'un entretien en mars 2007, a très bien exposé ce problème, précisant d'ailleurs que la chasse aux phoques est l'une des solutions à ces difficultés. En effet, Pekka Salmi et *al.* (2005, 46) présentent dans leur étude trois différentes solutions au problème des phoques : le changement du lieu de pêche, l'amélioration du matériel utilisé ou, enfin, la réduction de la population de phoques par la chasse. Mais il est évident que les pêcheurs optent plutôt pour la dernière solution.

Depuis les années 1970, le statut des phoques de la Mer Baltique a subi de nombreux changements. Au début de cette décennie, l'Union Soviétique et la Suède ont amélioré la protection du phoque gris alors que la Finlande le considérait comme un animal nocif qui pouvait être chassé toute l'année. Depuis, sa population a considérablement grandi, certainement influencée par l'interdiction de chasse dans les années 1980 afin de sauver l'espèce. Mais, depuis la fin des années 1990, la chasse est réouverte permettant aux autorités de mieux contrôler les populations de phoques. Une réglementation stricte a toutefois été mise en place afin d'éviter tout abus. En Finlande et en Suède, la période de chasse est, depuis 2004, ouverte du 16 avril au 31 décembre. Les chasseurs ont besoin d'une licence et doivent chasser là où des dommages avec l'aquaculture ont lieu. Des quotas ont également été instaurés pour le phoque gris, seule espèce qui peut être chassée. Le chasseur de phoques que nous avons rencontré a précisé que sa licence lui permet de capturer 35 phoques par an. Cependant, les quotas ne sont jamais atteints et en 2004, seuls 34% du quota de phoques ont été utilisés (Helle et Stenman, 2005, 82). Le chasseur a même dit que, dans quelques années, le manque de chasseur se fera sentir.

La chasse aux phoques dépend grandement des conditions glacielles. Si elle est permise dans les golfes de Botnie et de Finlande, c'est parce que leur couvert de glace permet aux phoques d'y mettre bas. Ainsi, au printemps, des populations parfois gigantesques de phoques gris (plus de 2000 par groupe) peuvent être aperçues sur la banquise de la Mer et de la Baie de Botnie. Auparavant, on chassait pour vivre et les chasseurs de phoques étaient bien souvent des pêcheurs. De nos jours, la chasse aux phoques est plutôt devenue un hobby souvent traditionnel et familial qui permet de passer des journées entières sur la glace et de profiter, selon J. Heinikoski, de cet environnement saisonnier. Quand il part chasser, il ne va jamais seul mais accompagné de cinq personnes avec qui il partage la même licence de chasse. Leur excursion de plusieurs jours à deux semaines se déroule en général dans la Baie de Botnie, non loin de Kemi. Durant l'entretien, le chasseur a souligné qu'il faut bien connaître et comprendre le milieu marin en période glacielle et donc faire attention aux intempéries, aux mouvements de la glace et s'informer sur la direction du vent et des courants marins. Ainsi, les chasseurs utilisent des images satellites de la NASA et les informations du service des glaces. Il se souvient par exemple qu'en 1993, en six jours, la glace avait migré vers le Nord-Est sur 250 kilomètres. Il faut donc être d'autant plus vigilant que la zone de chasse du phoque

gris se situe à la limite entre la banquise et l'eau libre de glace. Sur cette frange instable, les conditions glacielles sont les plus affectées par des agents externes tels le vent et les courants et, de longs et larges morceaux de banquise peuvent se fragmenter. Pour se déplacer, les chasseurs utilisent un bateau qu'il est alors nécessaire de pousser quand il est sur la banquise et qu'il est impératif de ne pas quitter. Les conséquences d'imprudence peuvent être graves comme l'a raconté J. Heinikoski par cette anecdote.

Alors que deux hommes chassent un phoque, ils s'éloignent du bateau pour abattre l'animal. Mais pendant ce temps, la glace se fragmente et le bateau commence à flotter et à s'éloigner lentement. Les deux hommes se retrouvent sur un morceau de glace de quelques centaines de mètres et large d'une soixantaine de mètres. Rapidement il faut prendre une décision et l'un d'eux enlève ses bottes et commence à nager derrière le bateau qui se déplace lentement. L'eau est proche de zéro degré et le vent mobilise le bateau en le tenant à distance du nageur. L'homme arrive quand même à atteindre le bateau et à y monter. Mais, lors du retour, les deux hommes doivent faire appel à une ambulance qui les attend sur la rive car le nageur est en état d'hypothermie et doit passer plusieurs jours à l'hôpital.

Selon J. Heinikoski, la chasse aux phoques redevient peu à peu populaire mais l'organisation d'une excursion nécessite d'importants efforts et la connaissance parfaite du milieu et des aléas susceptibles de survenir. Dans le dernier chapitre de cette partie, on reviendra sur la question des risques en mer gelée.

7.4 – CONCLUSION : ATTRACTIVITE DE LA BANQUISE POUR LES UNS, REPULSION POUR LES AUTRES

Bien d'autres activités sont pratiquées sur la banquise mais elles ne concernent qu'une minorité de gens. Ainsi, la nage dans l'eau gelée est une pratique traditionnelle, toujours appréciée par de nombreuses personnes âgées. Des activités de recherche sont également menées sur l'environnement marin pris en glace (comportement et géophysique des glaces de mer, étude des phoques...).

Les quelques exemples fournis dans ce chapitre sont révélateurs d'une attractivité évidente de la banquise dans le Nord de la Baltique qui conduit à une véritable appropriation de l'espace marin gelé et à sa mise en valeur. Par ailleurs, au-delà de l'attachement traditionnel des populations littorales à cet espace saisonnier et à ses pratiques, la banquise devient de plus en plus l'objet d'une convoitise touristique contemporaine. Kirsi Eskola, responsable touristique du camping situé à Nallikari, Oulu, l'a bien exprimé lors d'un entretien le 12 Janvier 2005 :

"I do the guided tours in town for the tourists[...]. We have a great cathedral in the city center, it would be great thing to show to people who come from abroad, but then if you think that when you come from France, well, you've seen a lot of cathedrals in your country! So what's the difference in ours? But then when I get them to the beach of Nallikari in the middle of the winter and they see the frozen sea [...]. I tell them that "well here you have the sea, that is the sea, it's frozen and you can walk on it" and they just woah let's go to the sea and walk on the ice and they stay there half an hour, one hour [...]. They're really like fascinated by, doesn't matter how they are wearing, good things, good shoes to go, they just go and that's really something they are going to remember when they go back [...]. So it's not a cathedral or another nice house here in the city center but it's the frozen sea that they have walked on it"²⁹.

Cet extrait illustre clairement l'attractivité touristique internationale de la banquise. Pour des touristes étrangers qui n'ont jamais vu la mer gelée, l'envie de se rendre sur place paraît totalement justifiée si l'on en croit notre propre expérience. D'ailleurs, les Finlandais restent toujours un peu surpris devant la fascination de ces touristes étrangers pour cette immensité blanche qui leur est, à eux, si familière. Pourtant, depuis quelques années, les acteurs du tourisme à Oulu pensent à mettre de plus en plus en valeur la banquise en organisant des excursions, en louant des skis... Mais, il reste tout de même encore beaucoup d'efforts à faire pour que ce tourisme hivernal soit pleinement développé et que la région puisse économiquement en profiter au maximum. Car, située au Sud de la Laponie, la région d'Oulu n'est surtout qu'une escale sur le chemin des pistes de ski laponnes, voire du fameux village du Père Noël...

À titre de comparaison, on note que, dans le Golfe de Riga, le comportement des populations est tout autre. En effet, la mer gelée n'est considérée que comme un espace sur lequel on ne s'aventure pas pour ne pas encourir de risque. Il nous a paru clair ici que les habitants préfèrent regarder la banquise de loin.

Jusqu'à présent, l'étude des pratiques de la banquise a ignoré une activité essentielle qui, économiquement, est la plus considérable : la navigation maritime hivernale, l'objet du chapitre suivant.

²⁹ « Je suis guide touristique [...]. Nous avons une magnifique cathédrale en centre ville qui serait très intéressante à montrer aux touristes étrangers, mais si vous pensez que quand vous venez de France, vous avez beaucoup de cathédrales dans votre pays ! Alors quelle est la différence avec les nôtres ? Mais quand je les emmène à la plage de Nallikari au milieu de l'hiver, ils voient la mer gelée [...] Je leur dis « ici vous avez la mer, c'est la mer, elle est gelée et vous pouvez marcher dessus » et ils sont surpris, vont marcher sur la mer et y restent une demi-heure, une heure [...]. Ils ont l'air tellement fasciné que ça leur est égal comment ils sont habillés, avec de bons vêtements ou de bonnes chaussures pour y aller, ils veulent y aller et c'est vraiment quelque chose dont ils se souviendront quand ils retourneront chez eux [...]. Ce n'est donc pas une cathédrale ou un autre bâtiment en centre ville qui les intéresse mais c'est la mer gelée sur laquelle ils ont marché ».

La navigation hivernale et la banquise

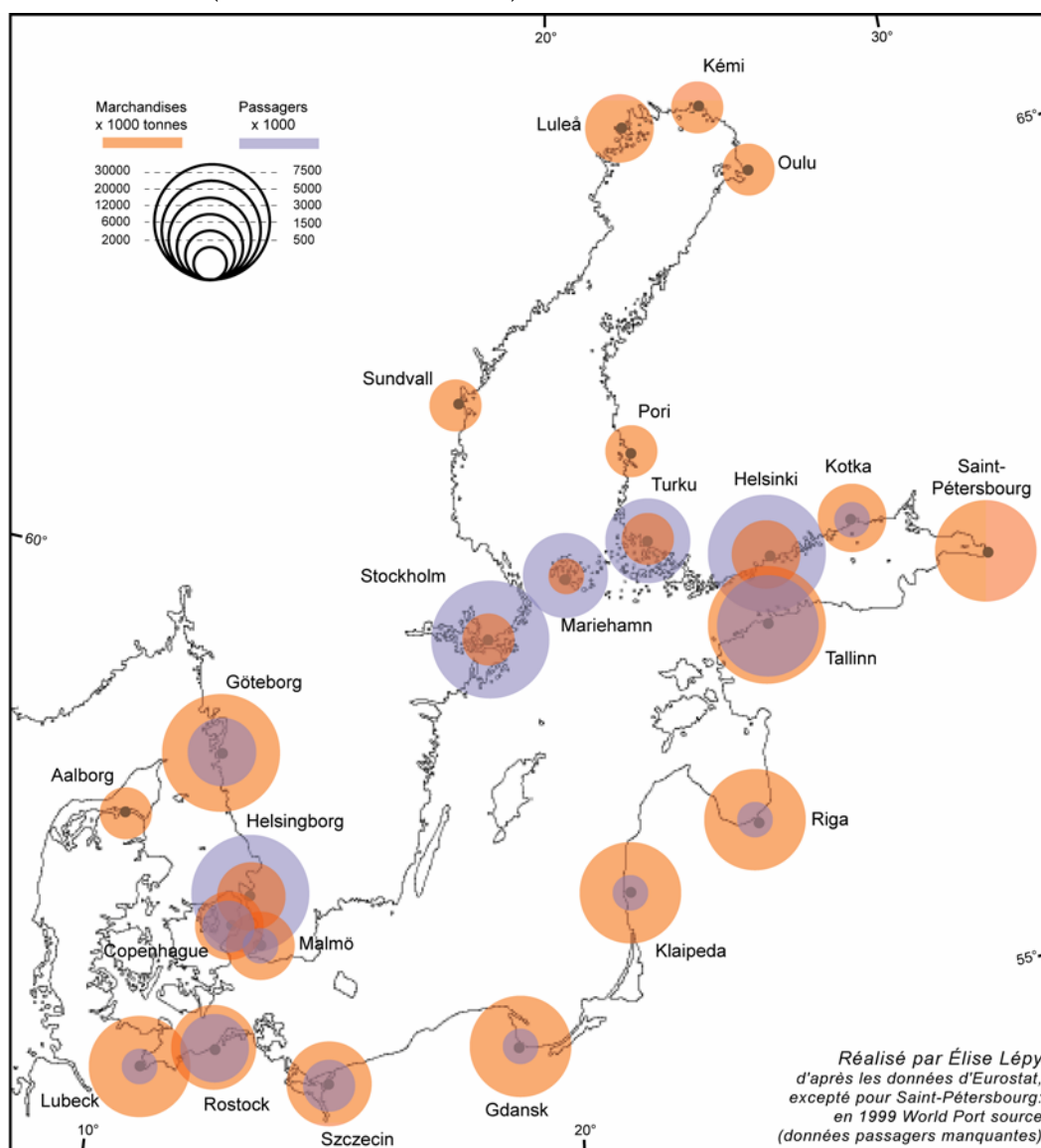
Depuis les temps hanséatiques, les côtes de la Baltique sont dotées d'infrastructures portuaires de capacité suffisante pour transporter les marchandises entre l'Ouest et l'Est de l'Europe. La Mer Baltique constitue donc depuis bien longtemps un carrefour maritime d'importance pour les échanges internes à la région mais aussi pour le commerce extérieur. Son activité maritime a connu de nombreux changements dans son organisation spatiale, influencés par l'histoire de ses pays riverains. Bien entendu, le changement majeur de ces dernières années demeure celui de l'indépendance des pays baltes en 1991 et de leur intégration dans l'Union Européenne quelques années plus tard. En effet, pendant l'époque soviétique, la façade orientale de la Baltique était « *organisée suivant le principe de complémentarité portuaire* » (Serry, 2005, 40) desservant l'Union Soviétique, alors que de nos jours, il existe une véritable concurrence entre les ports de la Baltique orientale (Buchhofer, 1995, 73 ; Serry, 2005, 40).

La Mer Baltique est l'un des espaces maritimes où le trafic est le plus intense. La croissance de son commerce maritime a connu une augmentation régulière. En 1989, le trafic total des ports de la Baltique était de 96,3 millions de tonnes et a atteint les 172,2 millions de tonnes en 2002 (Serry, 2005, 41). En 2005, l'intensité de cette activité pouvait se traduire par les chiffres suivants : 56 000 navires passant par l'île de Gotland et 40 000 entrant ou quittant le Golfe de Finlande (HelCom, 2006, 1). En 2007, plus de 130 000 navires ont fréquenté la Mer Baltique transportant plus de 300 millions de tonnes de marchandises. La Baltique est également dotée d'un excellent réseau pour le transport de passagers (carte 31) : environ trente millions de personnes par année voyagent par ferry en Mer Baltique (Swedish Maritime Administration, 2006, 1). D'année en année le nombre et la taille des navires ne cessent d'accroître et il est désormais possible de voir naviguer des bateaux transportant plus de 150 000 tonnes de pétrole en Baltique (*ibid.*, 3). Le transport pétrolier n'est pas le seul à avoir connu une forte expansion, le trafic de passagers notamment concentré sur les axes Finlande-Suède et Finlande-Estonie et le trafic roulier sont aussi de bons exemples du développement des échanges intrabaltiques (Serry, 2005, 48).

Le commerce extérieur de la Mer Baltique est important et il passe principalement par les détroits danois – une autre partie emprunte le réseau fluvial à l'Est. Dans la région baltique, approximativement 50% du commerce extérieur sont transportés

par voie maritime. En 2003, le transport maritime de ou vers des destinations hors région baltique comptait pour 76 % du transport maritime total contre 24 % pour le trafic intra-baltique. Les connections entre la Mer Baltique et la Mer du Nord sont ainsi nombreuses et certaines régions de la Baltique profitent davantage de ces échanges. Elles concernent principalement :

- le Golfe de Finlande qui inclue les plus gros ports de la Baltique orientale avec 230 millions de tonnes,
- la côte Est du Golfe de Botnie – seulement les ports finlandais sont concernés – qui totalise 35 millions de tonnes,
- les trois états baltes et la région de Kaliningrad qui comptent 103 millions de tonnes,
- la côte Est suédoise et la Pologne qui comptabilisent 55 millions de tonnes chacune (Matczak et al., 2006, 33).



Carte 31 – Les ports de la Mer Baltique en 2007

Map 31 – Baltic Sea ports in 2007

Inévitablement, l'intensité croissante du trafic en Mer Baltique (cf. les prévisions du trafic pour 2017, carte 32) a des conséquences directes sur la pollution de l'environnement marin et sur le nombre d'accidents de navigation. D'autre part, la présence des glaces contribue l'hiver aux mauvaises fortunes de mer puisqu'elle représente un obstacle évident pour les navires. Les glaces de mer ont ainsi une grande influence sur la navigation hivernale. Alors que l'espace marin de la Baltique n'était jadis exploité qu'à la saison estivale, l'amélioration considérable apportée à la construction des navires, l'instauration de réglementations et les différentes aides à la navigation ont permis à la navigation hivernale de se développer pendant les dernières décennies. L'historique de la navigation maritime hivernale en Mer Baltique sera décrite dans le chapitre 11 dans le cadre des impacts économiques des variations des conditions glacielles.

De nos jours, le trafic maritime hivernal ne semble plus être autant affecté par les conditions météomarine difficiles qu'auparavant. Même si, effectivement, la formation d'un couvert de glace est susceptible d'entraver la navigation maritime, le tableau 20 montre bien que les ports localisés dans les sites les plus englacés (Baie de Botnie) ne sont pas forcément les plus touchés par cette baisse de fréquentation hivernale. À titre d'exemple, bien que les ports d'Oulu et de Riga ne bénéficient pas de la même position géographique avec leurs avantages et leurs inconvénients, la Baie de Botnie et le Golfe de Riga étaient totalement pris en glace pendant l'hiver 2004/05. Néanmoins, le trafic hivernal cumulé des mois de janvier, février et mars correspondait alors, dans les deux cas, à un peu plus d'un quart du trafic annuel, soit 25,6% pour le port d'Oulu et 25,8% pour le port de Riga. Ces chiffres signifient donc que les variations saisonnières qui étaient évidentes avant les années 1970, se sont peu à peu estompées et que, désormais, elles n'existent pratiquement plus malgré la présence des glaces de mer. En moyenne, le port d'Oulu accueille une petite quarantaine de navires par mois alors que le port de Riga en reçoit entre 300 et 400.

Par ailleurs, l'augmentation rapide du trafic maritime ces dernières décennies a eu des effets non négligeables sur les caractéristiques glacielles des eaux de la Baltique avec l'influence principale des brise-glaces et des navires qu'ils assistent.

La littérature se référant aux activités maritimes pendant la période hivernale en Mer Baltique est assez condensée. De l'action des glaces sur la coque des navires au fonctionnement des brise-glaces, la navigation hivernale a fait l'objet de nombreuses études. Des rapports de recherche spécialisés dans la navigation maritime hivernale dont le *Winter Navigation Research Board* (*Styrelsen För Vintersjöfartsforskning*) produit de la coopération finno-suédoise de deux instituts, le FMA (*Finnish Maritime Administration*) et le SMA (*Swedish Maritime Administration*) en charge de s'occuper de la sécurité maritime,

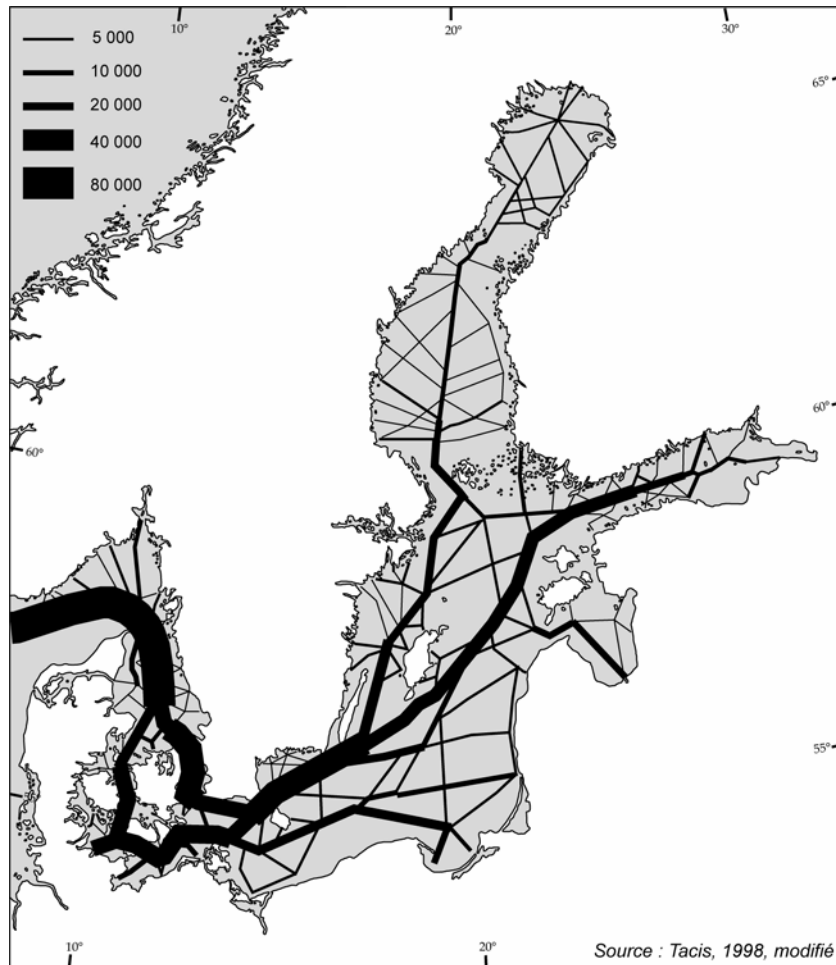
sont publiés régulièrement (Lundqvist et Bergquist, 2000). Ainsi, divers sujets sont discutés, notamment la résistance de la coque des navires face aux murs de glace (*ridges*) (Keinonen, 1978), le coût économique engendré par la navigation maritime hivernale (Johansson, 1977 ; Terho, 1979), ou encore l'analyse et la mesure des tensions induites par la glace sur la coque d'un brise-glace (Varsta, 1977).

Les travaux publiés par les chercheurs sur le rapport glace / navires et l'existence de services d'aide à la navigation hivernale permettent de se rendre compte de l'importance de cette dernière pour les pays riverains de la Mer Baltique. L'accès aux ports est alors primordial pour le bon fonctionnement de l'économie de chaque pays même si des restrictions doivent être mises en place.

	Janvier-Mars	Avril-Juin	Juillet- Septembre	Octobre- Décembre	Total annuel
Lubeck	1493	1472	1570	1540	6075
Rostock	1796	1896	1915	1899	7506
Tallinn	1478	2627	3056	2103	9264
Riga	264	360	415	369	1408
Klaipeda	622	710	769	738	2839
Gdansk	754	883	836	758	3231
Szszecin	1469	1963	2240	1838	7510
Helsinki	1879	3393	3774	2771	11817
Kemi	162	155	171	176	664
Kotka	668	758	812	787	3025
Mariehamn	1250	1397	1414	1285	5346
Oulu	144	157	133	146	580
Pori	232	218	228	237	915
Turku	671	684	742	671	2768
Helsingborg	10756	11381	11543	11479	45159
Luleå	151	157	200	174	682
Malmö	763	799	836	817	3215
Sundsvall	138	151	152	141	582
Stockholm	1136	1344	1320	1147	4947
Göteborg	1903	2042	2180	2055	8180

Sources : Eurostat

Tableau 20 – Fréquentation des ports de la Mer Baltique (nombre de navires) en 2007
 Table 20 – Baltic Sea port traffic (number of ships) in 2007



Carte 32 – Trafic annuel maritime prévu en 2017 en Mer Baltique
 Map 32 – Annual maritime traffic predicted for 2017 in the Baltic Sea

8.1 – CLASSIFICATION DES NAVIRES ET RESTRICTIONS AU TRAFIC HIVERNAL

La navigation hivernale s'organise autour de trois éléments : les navires marchands, les brise-glaces qui les assistent, et les autorités maritimes qui gèrent les activités de ces derniers. La variabilité de la sévérité des conditions glacielles ne permet pas à tous les navires de naviguer dans les glaces de mer ou d'être assistés par un brise-glace. Le nombre de brise-glaces, même s'il paraît important dans le Golfe de Botnie, est toutefois limité par rapport à l'importance croissante du trafic. De ce fait, des restrictions du trafic ont été imposées aux navires en fonction de leur capacité à naviguer dans les glaces de mer.

Le premier statut concernant la construction et l'équipement des navires pour la navigation hivernale a été adopté en 1890. Mais alors, seuls quelques navires de passagers étaient concernés par cette nouvelle réglementation imposant le renforcement des navires de la poupe à la proue et l'usage d'un double fond sous la salle des machines. Il a fallu

attendre quelques décennies avant que cette réglementation soit appliquée à d'autres navires.

Désormais les normes de construction des navires sont de plus en plus exigeantes, imposées par les autorités maritimes et l'Association internationale des sociétés de classification (IACS). Dans ce cadre réglementaire, la Finlande est considérée comme l'un des états les plus actifs dans la mise en place des réglementations de navigation en glaces de mer émises par les autorités publiques (Siivonen, 1979, 154). Depuis les premières réglementations, les classifications des navires ont évolué en fonction des nécessités de sécurité et de navigation, et des conditions glacielles. La figure 15 décrit ces grandes étapes, de l'instauration de trois catégories de navires par le Bureau de la Navigation (*Board of Navigation*) en 1921, à la mise en place des classes actuelles définies en 1971 par la coopération entre la Suède et la Finlande. Au fur et à mesure, les réglementations ont recouru à des critères plus stricts pour le renforcement des coques et la puissance des navires. À titre d'exemple, le plus petit navire de la classe IA est de 3500 dwt³⁰ avec une sortie de moteur de 1100 kW.

Par ailleurs, dans les années 1970, l'Association internationale des sociétés de classification proposa pour la première fois une classification universelle de la réglementation de la navigation en glace de mer unifiant les normes finno-suédoises, canadiennes et soviétiques (*ibid.*, 167). Ce projet est toujours d'actualité même si certains efforts ont été entrepris au sein des pays riverains de la Baltique³¹.

En définitive, seuls les navires de la classe I, selon la sévérité des conditions glacielles, peuvent être assistés d'un brise-glace si nécessaire à l'exception des navires de la classe IA Super dont la structure, le moteur et d'autres propriétés sont capables de naviguer dans des conditions de glace extrêmement difficiles sans aucune assistance. Les navires de la classe II ont généralement une coque en acier suffisante pour naviguer dans les eaux très légèrement englacées. La classe III concerne les navires qui ne peuvent naviguer que dans les eaux libres de glace (Finnish Maritime Administration, 2008, 4).

Bien entendu, les restrictions du trafic hivernal deviennent de plus en plus sévères en fonction de la difficulté à naviguer dans les glaces de mer. Ces restrictions dépendent non seulement de la classe à laquelle appartient un navire mais également de son port en lourd. La figure 16 illustre de telles restrictions hivernales lors de cinq hivers précédemment cités dans notre étude et révélateurs de cinq cas différents : l'hiver 1988/89 extrêmement modéré, l'hiver 1998/99 modéré, l'hiver 2002/03 moyen, l'hiver 1978/79 sévère et l'hiver 1986/87 extrêmement sévère.

³⁰ dwt est l'abréviation anglaise de « deadweight tons » qui correspond aux « tonnes de port en lourd »

³¹ En annexe 13, figure la correspondance des « ice class » des différentes sociétés de classification

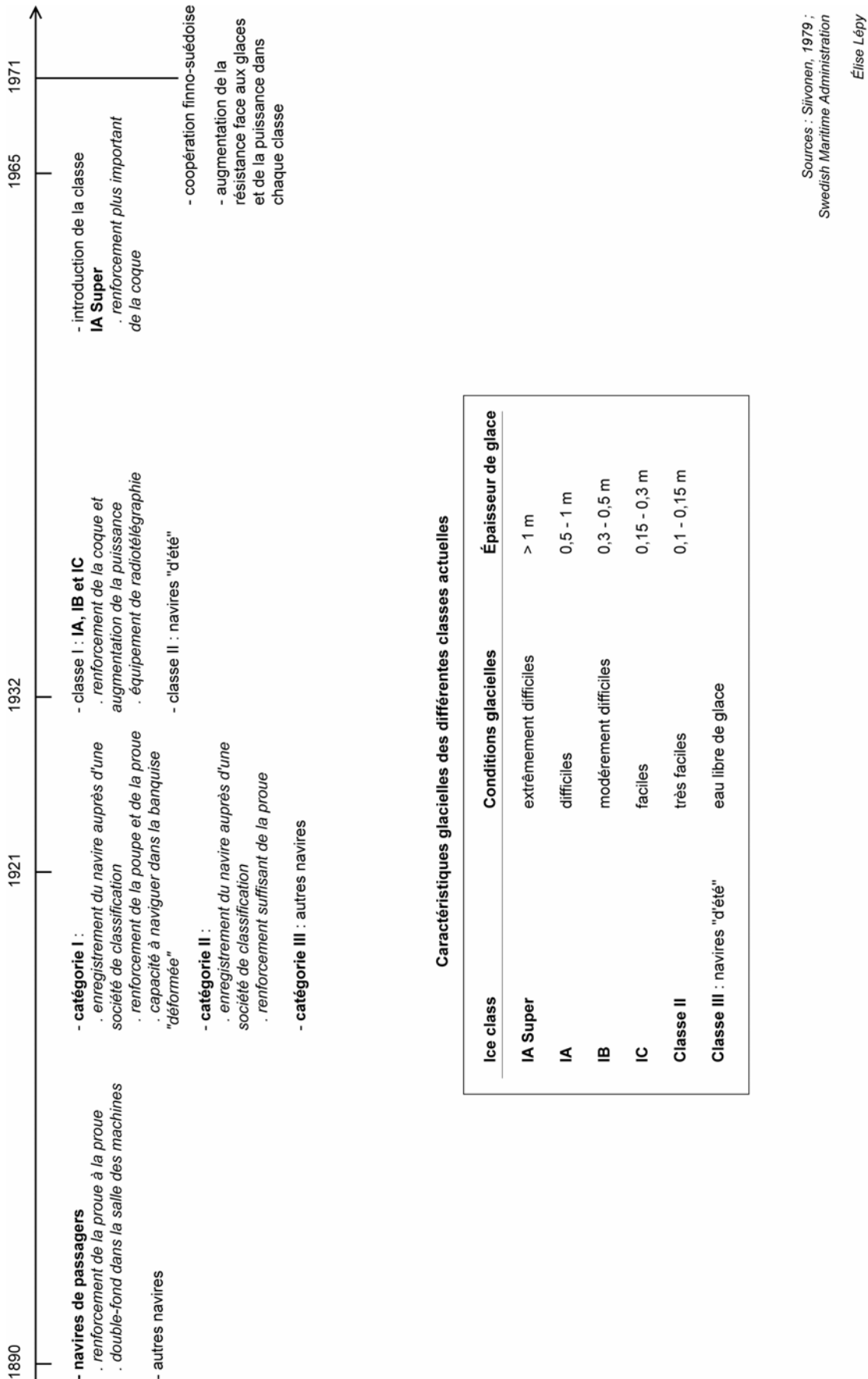


Figure 15 – Évolution chronologique des réglementations sur la classification des navires
Figure 15 – Chronological evolution of ice-class rules

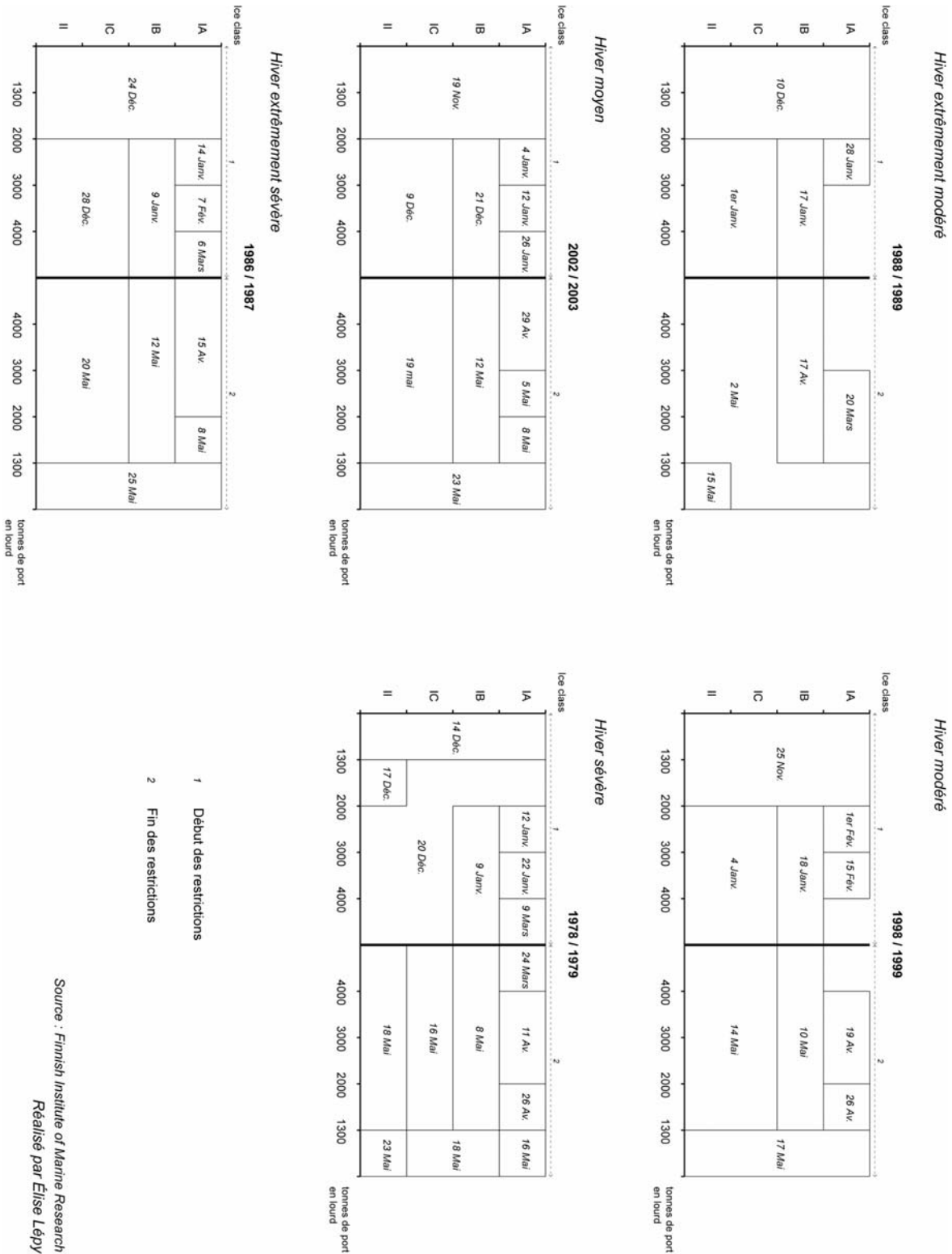
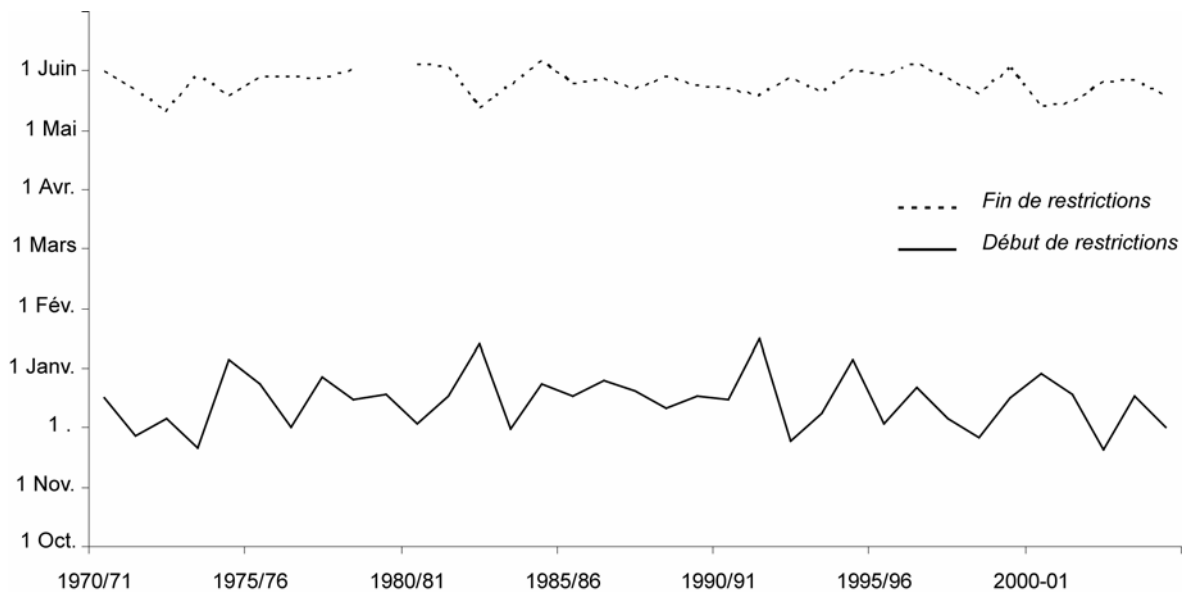


Figure 16 – Les restrictions maritimes dans le Nord de la Baie de Botnie lors des hivers extrêmement modéré (1988/89), modéré (1998/99), moyen (2002/03), sévère (1978/79), et extrêmement sévère (1986/87)
Figure 16 – Maritime restrictions in Northern Bay of Bothnia for extremely moderate (1988/89), moderate (1998/99), average (2002/03), severe (1978/79), and extremely severe (1986/87) winters

Les restrictions du trafic hivernal, depuis longtemps mises en place par les autorités maritimes, ont énormément évolué en fonction des modifications et améliorations apportées à la construction des navires. Le graphique 30 rapporte les dates de début et de fin de restrictions fournies pour chaque hiver depuis 1970/71 pour les navires de la classe II, soit ceux qui ont les plus petites résistances et puissances pour la navigation dans les glaces de mer. Les variations révèlent en partie la dureté de l'hiver et donc les plus ou moins précoces prise en glace et fonte. Toutefois les quinze premières années présentées dans le document indiquent des restrictions de plus en plus tardives très certainement liées aux plus grandes capacités des navires.



Réalisé par Élise Lépy
d'après les données du Finnish Institute of Marine Research

Graphique 30 – Les dates de restrictions hivernales de la classe II à Oulu de 1970 à 2005
Graph 30 – Winter restriction dates of ice class II at Oulu from 1970 to 2005

De façon logique, les conditions glacielles influent sur les dates de début et de fin de restrictions. Mais, il semble opportun de se demander si le nombre de jours de restrictions hivernales est influencé par l'englacement maximal de la Baltique et / ou sa saison glacielle. D'après les données du tableau 21, la durée de la saison glacielle aurait davantage d'impact sur les dates des restrictions que l'extension maximale de la banquise, sachant que quatre des périodes présentées ont un coefficient de corrélation supérieur à 0,8 contre deux seulement pour l'extension de la banquise. En revanche, le nombre de jours de restrictions a été très faiblement lié aux deux variables pour la période 1985-1990, ce qui s'explique par la présence dans la même période de temps des hivers sévères de 1985, 1986 et 1987, et de l'hiver extrêmement modéré de 1989.

	Extension maximale des glaces	Saison glacielle
1970-75	0,430	0,689
1975-80	0,262	0,819
1980-85	0,394	0,849
1985-90	- 0,537	0,133
1990-95	0,257	0,845
1995-2000	0,806	0,581
2000-2005	0,912	0,860

Élise Lépy

Tableau 21 – Corrélation entre le nombre de jours de restrictions hivernales et les deux variables : englacement maximal de la Baltique et durée de la saison glacielle

Table 21 – Correlation between the number of winter restriction days and the maximum of Baltic ice extent, and the length of the ice season

Ces résultats prouvent que les restrictions à la navigation ne sont pas tant liés à l'extension de la banquise qu'à la durée de la saison glacielle (tableau 21), sachant que les conditions glacielles locales peuvent être également mises en cause (Strübing, 2007, 77).



Photographie 27 – Cargo entrant dans le Port de Riga, embouchure de la Daugava – Mangalu Pussala – 18 mars 2006

Picture 27 – Cargo arriving to the Port of Riga, mouth of the Daugava – Mangalu Pussala – March 18th 2006

8.2 – LES AIDES A LA NAVIGATION

Contrairement à d'autres mers englacées du globe dont le pack reste immobile pendant plusieurs mois, la banquise de la Mer Baltique – à l'exception de la banquise côtière toujours fixe au rivage – subit des mouvements fréquents de ses blocs de glace et de nombreuses déformations de sa couverture. La navigation dans les glaces de mer sollicite d'une part, une aide fournie par les services de déglacage afin de d'ouvrir les routes maritimes, et d'autre part, des moyens d'information nécessaires à la connaissance précise des routes maritimes à emprunter pour atteindre le fond des golfes.

Afin de pallier les inconvénients de la présence des glaces marines hivernales et de faciliter l'accès aux ports, les administrations maritimes finlandaise et suédoise ainsi que celle de Lettonie (*Maritime Administration of Latvia*) ont développé des services répondant aux besoins des navires et autres embarcations pendant l'hiver. Elles ont pour mission d'assurer la sécurité maritime, de maintenir ouverts les chenaux pris en glace, d'assister le trafic maritime et de fournir aux navires les informations sur les conditions climato-marines.

Lors de ces dernières décennies, la nouvelle génération de brise-glaces et la coopération finno-suédoise pour le déglacage et l'assistance aux navires d'une part, l'augmentation des performances des bateaux à naviguer dans les glaces de mer d'autre part, et enfin les restrictions plus adaptées aux conditions glacielles et à la classification des navires sont autant d'éléments ayant largement contribué à l'accroissement rapide du trafic hivernal notamment dans le Nord de la Baltique. Comme la navigation hivernale est complètement dépendante des interventions de déglacage et d'assistance des brise-glaces, les coopérations entre les autorités maritimes de différents pays riverains de la Baltique participent à l'amélioration des services donnés par les brise-glaces au travers du fonctionnement de réseaux qui font largement appel de nos jours aux nouvelles technologies satellitaires et de l'information.

8.2.1 - Le fonctionnement des brise-glaces

Bien entendu, le nombre limité de brise-glaces ne permet pas d'offrir une assistance individuelle à chaque navire. De ce fait, le nombre de navires qui entrent dans un espace recouvert de glaces de mer doit être réduit en fonction des conditions glacielles et du nombre de brise-glaces présents dans la zone concernée. Seuls les navires à coques adéquates capables de naviguer dans les glaces de mer ont l'autorisation de s'y aventurer (Jalonen et *al.*, 2005, 38).

L'équipage d'un brise-glace n'est pas uniquement concerné par l'ouverture des chenaux de navigation pour les navires se rendant dans un port nordique, mais les tâches qui lui sont attribuées sont bien plus nombreuses. Le capitaine du brise-glace doit tenir

informé et conseiller les navires se situant dans sa zone en fonction des conditions glacielles. Le brise-glace doit également aider un navire bloqué dans les glaces de mer en lui ouvrant le passage et, dans les situations plus difficiles, en le remorquant (Artela, 1979, 273). Le maintien des chenaux de navigation dans de bonnes conditions est indispensable et, pendant les hivers sévères, des convois peuvent être organisés. D'autres tâches peuvent être déléguées aux brise-glaces, dans des situations plus exceptionnelles, où il peut leur être demandé d'intervenir dans des opérations de sauvetage en mer (*ibid.*, 45).

Toutefois, les brise-glaces ne sont pas tous équipés de la même manière et ne sont donc pas tous habilités à accomplir les mêmes fonctions. Dans la Baie de Botnie, différents brise-glaces de taille et de puissance variable opèrent en mer gelée. C'est le cas des brise-glaces *Tuura* et *Sisu*³² (photographie 28) qui ont pu être visités au cours de nos missions. Ils sont tout à fait typiques du fonctionnement des brise-glaces finlandais et suédois.

8.2.1.1 – Le cas des brise-glaces *Tuura* et *Sisu*, caractéristique dans le fond du Golfe de Botnie

Le brise-glace *Sisu*, le plus puissant de la flotte finlandaise (16 200 kilowatts), navigue en pleine mer pour assister et escorter les gros navires. Il est géré par le FMA avec huit autres brise-glaces. Il intervient dans les eaux finlandaises (Golfe de Finlande) et finno-suédoises (Golfe de Botnie). En effet, dans un entretien accordé par le capitaine du brise-glace *Sisu*, ce dernier insiste sur l'excellente coopération entre la Finlande et la Suède dans le maintien des voies maritimes et l'assistance des navires dans le Golfe de Botnie : « *we have really good cooperation together, so sometimes we escort their ships to the harbour ... and then they are coming to our harbours*³³ » (Communication orale avec le capitaine du brise-glace *Sisu*, entretien du 8 mars 2007). D'autre part, le *Sisu* est capable de naviguer dans des conditions glacielles très difficiles comme traverser des champs de crêtes de glace. À 80 centimètres d'épaisseur de glace, la vitesse du brise-glace ne dépasse pas les 10 noeuds³⁴ (entretien oral avec le capitaine du brise-glace *Sisu* le 8 mars 2007).

Le *Tuura* est un brise-glace beaucoup moins puissant dont le propriétaire est la ville d'Oulu. Son champ d'intervention est donc plus réduit, se limitant au port d'Oulu. Cependant, ses fonctions ne se restreignent pas au déglacage des différentes zones portuaires mais également au remorquage des navires en difficulté dans le port. Nous avons eu l'occasion le 27 février 2005 de participer à une opération de remorquage d'un cargo accosté au quai de Toppila (point témoignage 3).

³² Une description succincte des brise-glaces *Tuura* et *Sisu* apparaît en annexe 14.

³³ « *Nous avons une très bonne coopération, donc parfois nous escortons leurs navires à leurs ports... et puis eux viennent jusqu'à nos ports* »

³⁴ 1 noeud correspond à 1 mille marin par heure soit 1,852 km/h



Photographie 28 – Les brise-glaces *Tuura* et *Sisu* accostés au quai de Virheäsaari – 8 mars 2007
Picture 28 – Icebreakers Tuura and Sisu docked at Virheäsaari – March 8th 2007

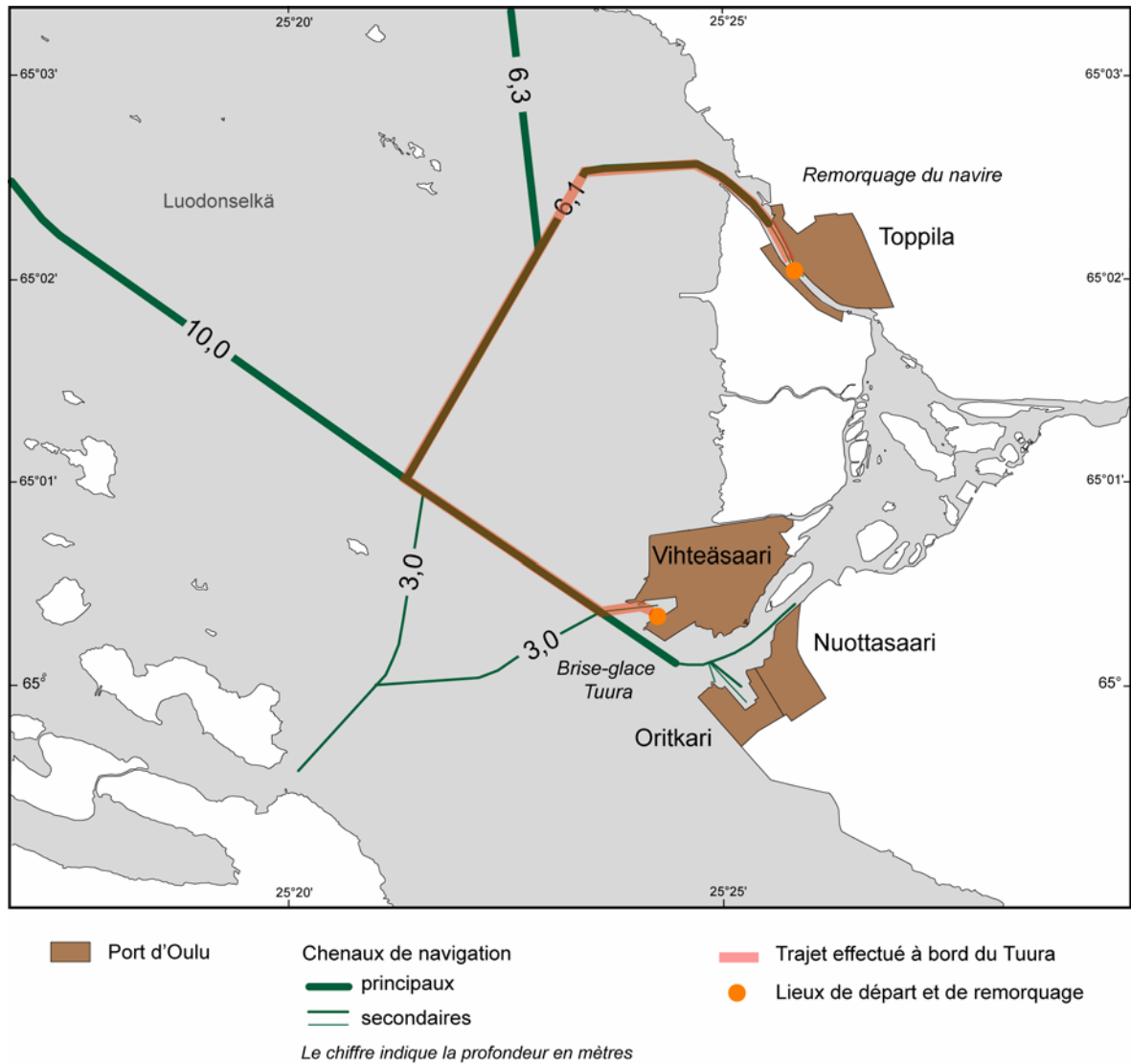


Photographie 29 – Remorquage du cargo *KCL Ballerina* par le brise-glace *Tuura* –
Port de Toppila, Oulu, 27 février 2005
Picture 29 – The icebreaker Tuura towing the cargo KCL Ballerina – Port of Toppila, Oulu, February 27th 2005

Point témoignage 3 : Le remorquage d'un cargo par le brise-glace Tuura

L'heure de rendez-vous avec le capitaine du brise-glace Tuura n'était pas réellement fixée puisque les opérations d'assistance du brise-glace dépendaient avant tout du départ du navire accosté à Toppila (carte 33). Un appel du capitaine quelques heures avant le départ de la mission et nous voilà embarquée dans une nouvelle expérience : naviguer à bord d'un brise-glace lors d'une mission de remorquage d'un cargo. Ce soir du 27 février 2005, la nuit tombe tôt dans l'après-midi et le départ du Tuura se fait dans une obscurité totale. Quelques marins, le capitaine, moi-même et nous voilà partis pour une mission de trois heures au départ du quai de Virheäsaari. Sur le pont du brise-glace, on peut entendre le craquement de la glace en train de se briser. La température moyenne journalière est de -14,1°C avec des minimums absolus atteignant -17,4°C. Le Tuura emprunte le chenal en direction de Toppila. Derrière notre passage, le chenal se referme, de nombreux glaçons flottent et le peu d'eau libre regèle immédiatement. Le plus impressionnant reste toutefois l'impression d'immensité de la banquise et la solitude du bateau. Le bruit qu'il produit est fort et la nuit accentue cette impression sonore. Les lumières du brise-glace éclairent l'immensité de la banquise sur laquelle rien ne se distingue hormis un espace blanc. L'arrivée au port de Toppila se fait tranquillement, le brise-glace change de direction de manière à se positionner correctement pour remorquer le cargo accosté. Celui-ci, le KCL Ballerina est un transporteur de ciment de 96 mètres de long. Sa ice class de type IA lui permet de pouvoir encore circuler à cette période de l'hiver (des restrictions pour ces navires de classe IA ont lieu entre le 1^{er} mars et le 11 avril 2005). Les marins effectuent les différentes opérations nécessaires au remorquage par câble du navire (photographie 29). Ce petit brise-glace va donc permettre au cargo de sortir du port et de rejoindre le chenal de navigation. Le brise-glace ouvre bien sûr la voie au navire avant de le laisser naviguer sur des chenaux entretenus par des brise-glaces d'une autre envergure tel le Sisü. Au retour, le Tuura emprunte le même chenal pour retourner à sa base.

La mission aura duré trois heures !



Réalisé par Élise Lépy

Carte 33 – Trajet du brise-glace effectué pour le remorquage du navire KCL *Ballerina* à Toppila
 Map 33 – Route of the ice-breaker for towing the ship KCL *Ballerina* in Toppila

8.2.1.2 - Le cas du brise-glace *Varma* dans le Golfe de Riga

À l'époque soviétique, les brise-glaces étaient appelés de Mourmansk (entretien oral avec le capitaine Dreimanis le 30 mars 2006) et ils répondaient en nombre, en fonction des besoins dans le Golfe de Riga. Mais, depuis l'indépendance de la Lettonie, un seul brise-glace, le *Varma*³⁵ (photographie 30), propriété du Port de Riga, fonctionne dans les eaux gelées du golfe depuis 1996 (entretien oral avec le directeur de l'administration maritime de Lettonie, le 28 mars 2006). Certains hivers modérés, le *Varma* reste à quai comme en 2007 et 2008 où la route du détroit d'Irbe à Riga n'a pris en glace. En revanche, quand les conditions glacielles sont plus sévères, comme en 2006, un seul brise-glace n'est

³⁵ Une description succincte du brise-glace *Varma* apparaît en annexe 14.

pas suffisant. Les autorités maritimes souhaiteraient la mise en fonctionnement d'un second brise-glace. La situation du 30 mars 2006, lors de notre mission à Riga, illustre bien ce désarroi : alors que le *Varma* assiste des cargos près de Kolka (détroit d'Irbe), d'autres navires sont en attente d'assistance au fond du Golfe. Et le temps d'attente peut être long : à titre d'exemple, entre le 11 et 18 mars 2006, 21 navires étaient stoppés à Kolka faute de brise-glace. Pourtant, le *Varma* travaille 24 heures par jour sur une centaine de milles marins. Cet hiver-là, le *Varma* ne revenait au port de Riga qu'une fois par semaine pour le ravitaillement (information orale du capitaine du port de Riga le 23 mars 2006). Le besoin d'un second brise-glace lors des hivers sévères se fait donc réellement sentir.



Photographie 30 – Le brise-glace *Varma* accosté au port de Riga
 Picture 30 – The icebreaker *Varma* docked at the port of Riga
 (Source : The port of Riga)

8.2.1.3 - L'assistance par les brise-glaces en quelques chiffres

Après le difficile hiver 2002/2003, les autorités maritimes et les services de déglacage de tous les pays de la Baltique décidèrent de mettre en place une organisation dont le but était de promouvoir la sécurité en mer pendant la saison glacielle. En 2004, l'organisation BIM (*Baltic Ice-breaking Management*) a donc vu le jour. Elle a pour objectif d'assurer le bon fonctionnement du trafic maritime en Mer Baltique en renforçant les coopérations entre tous les pays de la Baltique en période hivernale. Depuis, BIM publie chaque année un rapport où apparaissent les activités des brise-glaces de la Baltique.

Ainsi, en 2005/2006, plus de 6700 navires ont reçu l'assistance d'un brise-glace en Mer Baltique, près de 27% dans la Baie de Botnie et seulement 5,8% dans le Golfe de Riga. Bien évidemment, le pourcentage attribué au Golfe de Finlande traduit un trafic maritime plus important. Dans la Baie de Botnie, les brise-glaces ont alors fonctionné plus de cinq mois et dans le Golfe de Riga un peu moins de quatre mois (tableau 22). Il faut toutefois distinguer, dans le Golfe de Riga, deux routes différentes : celles qui joint le détroit d'Irbe au port de Riga, et celle qui arrive dans la Baie de Pärnu. Cette dernière est normalement prise en glace tous les hivers alors que le reste du golfe peut être complètement libre de glace. En 2006, 215 navires ont été assistés sur la route joignant le détroit d'Irbe au port de Riga, le reste des navires ayant été aidés aux abords de la Baie de Pärnu. Le brise-glace *Varma* fonctionna ainsi du 24 janvier au 24 avril. Durant les hivers 2006/2007 et 2007/2008 – le dernier a enregistré l'extension maximale de la banquise la plus faible depuis que des observations sont faites – le brise-glace *Varma* est resté à quai et aucun navire n'a été assisté sur la route menant au port de Riga. En revanche, la Baie de Botnie a bien pris en glace et l'activité des brise-glaces y a été essentielle (photographie 31).

Hivers	Lieux		Activité des brise-glaces	Navires assistés
2005-2006	Golfe de Riga	Riga	24 janv. – 24 av.	215
		Pärnu	1 ^{er} janv. – 28 av.	177
	Baie de Botnie		17 déc. – 26 mai	1870
2006-2007	Golfe de Riga	Riga	---	---
		Pärnu	6 fév. – 29 mars	76
	Baie de Botnie		16 janv. – 21 mai	1900
2007-2008	Golfe de Riga	Riga	---	---
		Pärnu	9 janv. – 11 mars	18
	Baie de Botnie		31 déc. – 9 mai	691

Source : Baltic Ice-breaking Management

Tableau 22 – Activités des brise-glaces en Baie de Botnie et dans le Golfe de Riga pendant les hivers de 2006, 2007 et 2008

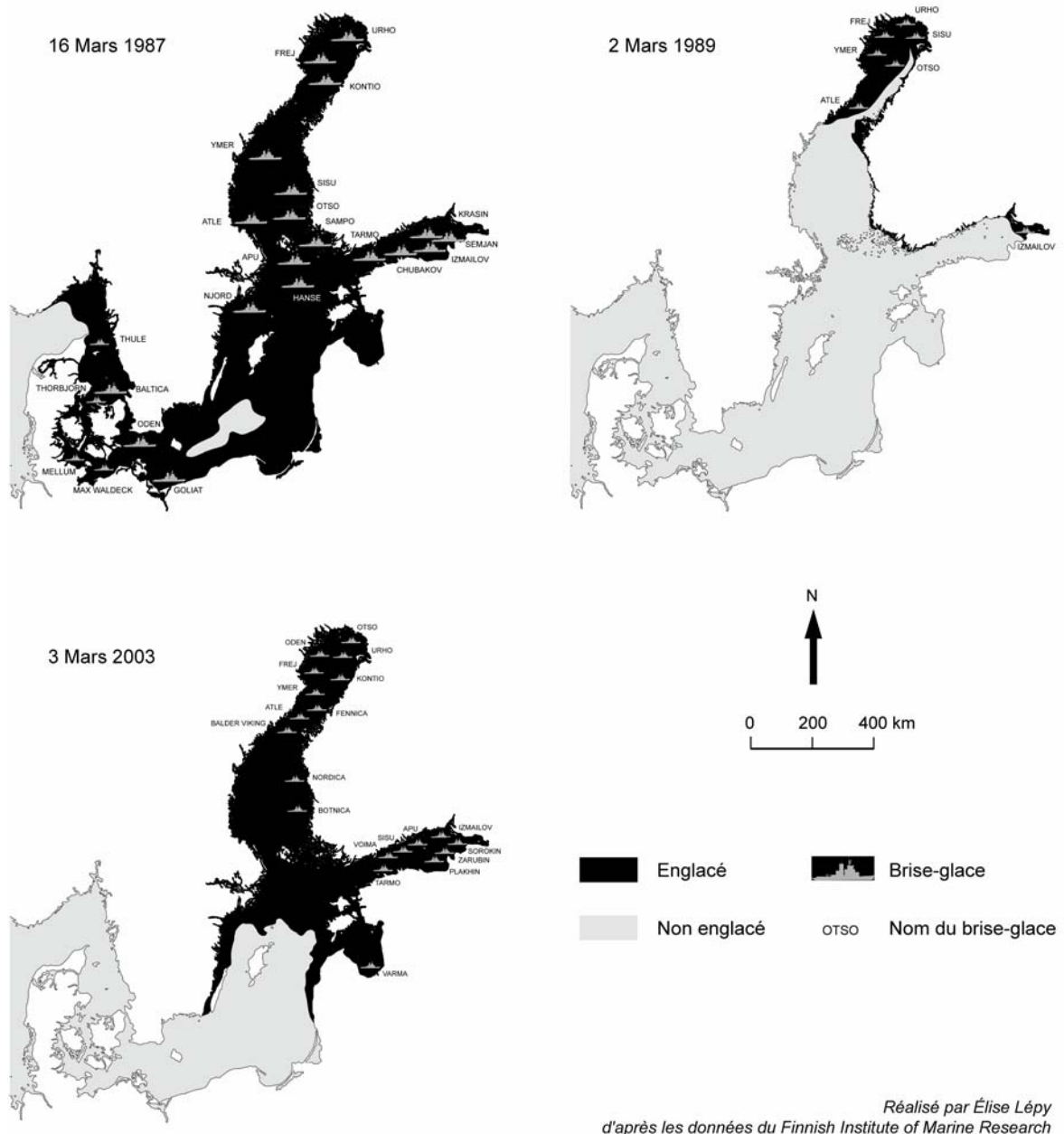
Table 22 – Icebreaking activities in the Bay of Bothnia and the Gulf of Riga in winters 2006, 2007 and 2008



Photographie 31 – Le brise-glace *Atle* en intervention dans la Baie de Botnie
 Picture 31 – Assistance of the icebreaker *Atle* in the Bay of Bothnia
 (Source : Swedish Maritime Administration)

En définitive, les interventions de déglacage et d'assistance sont contrôlées par les autorités maritimes de chaque pays. En Finlande, le FMA décide des restrictions du trafic et envoie les brise-glaces opérer en mer en fonction des conditions glacielles et des flux du trafic (Jalonen et *al.*, 2005, 47). En Lettonie, l'organisme chargé de la mise en place des restrictions hivernales est le Ministère des transports. Les cartes 34 présentent la localisation des brise-glaces en Mer Baltique pendant trois hivers différents : 1987 qui a été extrêmement sévère, 1989 extrêmement modéré et 2003 moyen. Le déploiement des flottes de brise-glaces s'est déroulé dans toute la Mer Baltique jusqu'aux détroits danois pendant l'hiver 1987. Ainsi, les flottes finno-suédoises³⁶ ont déployé une dizaine de navires dans le seul Golfe de Botnie, l'Union Soviétique a envoyé des brise-glaces dans le Golfe de Finlande, et les flottes suédoises, allemandes et danoises ont assisté les navires à l'entrée de la Baltique. Au contraire, seuls quelques brise-glaces ont porté assistance aux navires en Baie de Botnie et dans le fond du Golfe de Finlande pendant l'hiver 1989. En 2003, au-delà des flottes suédoises, finlandaises et russes qui ont opéré dans les golfes de Botnie et de Finlande, les brise-glaces estonien *Tarmo* et letton *Varma*, ont également été mis en fonctionnement le long des côtes estoniennes du Golfe de Finlande et dans le Golfe de Riga.

³⁶ Un récapitulatif des navires des flottes finlandaises et suédoises figure en annexe 15.



Cartes 34 – Position des brise-glaces lors de trois différents hivers, 1987, 1989 et 2003
 Maps 34 – Icebreaker location during three different winters, 1987, 1989 and 2003

8.2.2 – Des infrastructures portuaires adaptées aux conditions glacielles

L'aide à la navigation ne s'arrête pas aux seules routes maritimes englacées. Les ports des fonds des golfes de la Mer Baltique sont de la même manière pris en glace saisonnièrement. Contrairement à certaines régions aux conditions glacielles plus sévères où les chargements et déchargements peuvent se faire sur la banquise même tels les ports arctiques russes (Thorez, 2008, 53), les ports de la Baltique sont tous accessibles aux navires même si la présence des glaces marines pose deux problèmes : tout d'abord la

dégradation des structures portuaires par pression des glaces sur les quais, puis l'accès aux bassins et les espaces de manœuvre entravés par les glaces. La solution à ces problèmes est alors de réduire ou de faire disparaître les glaces de mer des eaux portuaires et de diminuer les forces engendrées par ces glaces sur les structures grâce à un système de contrôle des glaces.

Le cas du port d'Oulu (photographie 32) est exemplaire pour la Mer Baltique puisque d'autres ports comme celui d'Helsinki se sont inspirés de son système de contrôle des glaces (Pan et Eranti, 2009). Les infrastructures portuaires d'Oulu sont adaptées à la formation saisonnière des glaces de mer. Ainsi, lors de la planification et de la construction des quais, il a fallu prendre en considération les forces exercées par la glace sur les quais : l'usage, le modèle, la solidité et la position des quais doivent être adaptés à la présence des glaces. Alors qu'une protection maximale contre le mouvement des glaces de mer est requise, l'accès au port doit se faire aisément.

Pour cela, le port s'est doté d'un système de contrôle des glaces qui a été renouvelé en 2008 dans le bassin d'Oritkari. Ce nouveau système doit répondre aux besoins spécifiques du NETTS (*North European Transportation and Supply System*) qui relie plusieurs fois par semaine les ports d'Ajos et d'Oulu à celui de Lübeck et de Gothenburg. Les techniques de contrôle de la glace dans le port d'Oulu reposent sur deux actions principales :

- tout d'abord, le déglacage des eaux portuaires par le brise-glace *Tuura* est essentiel pour permettre l'ouverture des voies maritimes ;

- d'autre part, l'usage de rejet thermique en provenance de la zone industrielle proche associé à l'usage de produits chimiques permet à la glace de fondre. D'après H. Pan et E. Eranti (2009, 304), beaucoup de ports finlandais profitent ainsi des effluents thermiques pour résoudre les problèmes liés à l'entravement des zones portuaires par les glaces de mer. Toutefois, les hivers précédents, des navires ont eu quelques problèmes à s'amarrer sur le quai nord d'Oritkari. Un nouveau système de « air bubbler » a donc été installé dans le fond du bassin à flot depuis quelques mois. Ces dispositifs mécaniques produisent des bulles d'air qui, en remontant, entraînent les eaux plus profondes et plus chaudes vers la surface et accélèrent ainsi la fonte des blocs de glace. Ainsi, l'énergie thermique en provenance de la zone industrielle combinée au système du « air bubbler » devrait nettement améliorer le contrôle des glaces dans la totalité de la zone portuaire d'Oulu (Port of Oulu, 2008, 9).

Certains ports subarctiques font aussi appel à d'autres actions complémentaires telle l'utilisation de matières isolantes disposées sur les plans d'eau près des quais, et celle d'estacades flottantes pour détourner les blocs de glace (Tsinker, 2004, 499).



Photographie 32 – Le port d'Oulu (Vihreäsaari) pris en glace pendant l'hiver 2005

Picture 32 – Ice in Oulu harbour (Vihreäsaari) in winter 2005

(Source : Port of Oulu)

8.2.3 - Les technologies nouvelles d'information au service de la navigation hivernale

La constante coopération entre la Suède et la Finlande depuis les années 1960 a toujours permis l'amélioration du fonctionnement commun des opérations de déglacage et d'assistance aux navires. Ainsi, ces dernières années, les autorités suédoises et finlandaises se sont servies des nouvelles technologies de l'information (NTIC) pour développer conjointement un nouveau système d'information en ligne, IBNet (*IceBreaking Net*), afin de mieux coordonner les opérations communes de déglacage.

L'IBNet est un système d'information et de gestion informatisé utilisé par les services de déglacage. Il contient une grande quantité d'information sur les navires marchands (positions, vitesses ...), sur les restrictions du trafic, et sur les conditions météorologiques. Ces informations sont essentielles aux brise-glaces pour leurs opérations d'assistance. Ce système propose une interface géographique, IBPlott développée par le centre de recherche technique finlandais (VTT), qui affiche toutes les informations sur un seul et même document. Un exemple en est présenté annexe 16. IBPlott donne une information sur l'organisation du trafic maritime mais permet aussi aux utilisateurs d'avoir accès aux données météorologiques et glacielles, essentielles pour la navigation : les utilisateurs y consultent en réalité une image satellite superposée à une carte électronique où les positions et trajets des brise-glaces et des navires sont notés ainsi que d'autres informations telles l'épaisseur de la glace, la direction et la vitesse du vent. Ces dernières années, les images utilisées par IBPlott sont des images Radarsat, Envisat et Modis. Elles sont traitées dans des centres de télédétection avant d'être envoyées au

service des glaces de Finlande qui les distribuent ensuite aux autorités maritimes chargées de délivrer l'information aux brise-glaces (Berglund et *al.*, 2006).

Les données sur le trafic maritime sont diffusées par l'AIS (*Automatic Identification System*), système auquel IBNet est connecté. Le système AIS, muni de radio VHF, GPS et d'autres technologies d'information et de communication, fournit des données sur l'identité, le statut, la position géographique et la route des navires aux autorités maritimes et également aux autres navires équipés de ce système. Depuis 2005, la Mer Baltique est totalement couverte par le système HelCom AIS créé par la Commission d'Helsinki (HelCom), à la suite de plusieurs accidents en mer. IBPlott permet donc de recevoir une information combinée sur la situation du trafic maritime fournie par l'AIS et sur les conditions glacielles et météorologiques.

Afin d'améliorer le temps de voyage et de réduire la consommation de fuel tout en préservant les navires d'un accident ou incident dans les glaces de mer, des chercheurs (Kotovirta et *al.*, 2009) mettent en place un système qui présenterait les routes optimales dans les glaces de mer en tenant compte des paramètres naturels et économiques. Ce système doit donc intégrer modélisation des glaces et routes des navires.

Cependant, malgré une assistance à la navigation dans les glaces de mer de plus en plus développée et efficace, et une modernisation des outils d'information et de communication, les navires ne sont pas à l'abri d'incidents voire d'accidents.

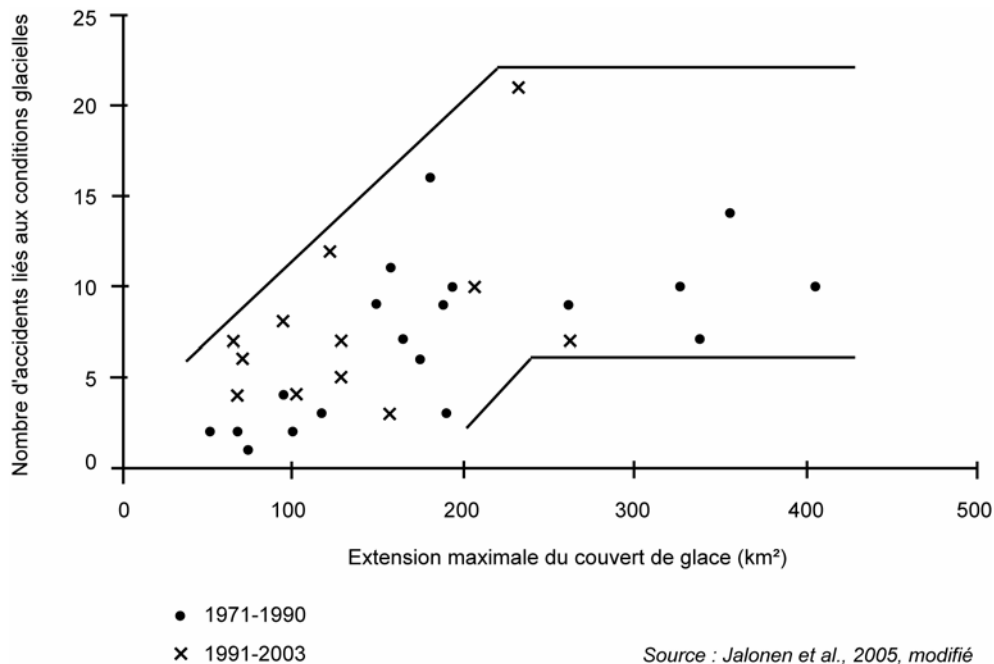
8.3 - LES MAUVAISES « FORTUNES DE MER »

Certes le développement des brise-glaces et le renforcement des navires a donc rendu possible la navigation dans les glaces de mer les plus septentrionales de la Baltique. Comme nous l'avons vu précédemment, le risque provoqué dans un contexte glaciaire est normalement contrôlé par la régulation du trafic maritime se fondant sur l'extension du couvert de glace et la sévérité des conditions glacielles, la régulation de la classification des navires et l'assistance des brise-glaces. Cependant, il y a des aléas subis pendant la navigation hivernale, se limitant heureusement le plus souvent à des dommages mineurs sans perte humaine (Jalonen et *al.*, 2005, 7).

Tous les hivers, des accidents en mer liés aux conditions glacielles sont rapportés par les autorités maritimes. En toute logique, plus les conditions glacielles sont sévères, plus il y a de navires accidentés comme l'indique le graphique 31 pour la période 1971 - 2003. On note que le lien établi entre les deux variables est plus fort avant les années 1990 qu'après du fait de l'amélioration récente constante des conditions de contrôle.

Le Golfe de Finlande où le trafic maritime est le plus développé, est la partie de la Mer Baltique enregistrant le plus d'accidents en hiver. Malgré un trafic beaucoup moins

important, les conditions glacielles sévères de la Baie de Botnie (en seconde position dans le classement) sont aussi à l'origine de nombreux accidents. Un plus faible pourcentage est constaté dans le Golfe de Riga : d'après le capitaine Cernovs³⁷, il semblerait que les accidents l'hiver en période glacielle soient limités car un seul chenal atteint Riga (entretien oral du 23 mars 2006).



Graphique 31 – Corrélation entre le nombre d'accidents en mer pendant la saison glacielle dans les eaux finlandaises et l'extension maximale du couvert de glace de 1971 à 2003
 Graph 31 – Correlation between the number of marine accidents in ice conditions of Finnish waters and the maximum extent of ice cover from 1971 and 2003

Selon Kaj Riska et al. (1998,4), la présence de la glace de mer peut influencer la navigation de deux manières : d'une part, la glace peut causer une charge lourde sur la coque du navire et gêner le bon fonctionnement du système de propulsion ; d'autre part, elle peut augmenter la résistance au mouvement du navire jusqu'à son arrêt et son blocage dans les glaces de mer. Il est ainsi possible de dresser une liste des types d'incidents et accidents les plus plausibles dans la navigation hivernale en Mer Baltique. Risto Jalonen et al. (2005) ont ainsi souligné dans leur étude concernant les eaux finlandaises que le cas le plus fréquent concerne l'échouement en mer gelée des navires sur un haut-fond (accident le plus répandu également en saison estivale). Cependant, les collisions sont également très fréquentes dans la navigation hivernale, toutefois différentes de celles ayant lieu en mer libre. Elles résultent souvent de manœuvres difficiles entre les brise-glaces et cargos assistés. D'autre part, la coque des navires est

³⁷ capitaine à la Garde-côtière lettone

souvent mise à rude épreuve. La compression sur la coque par mouvement du pack ou lors de changements de direction du bateau, sont souvent à l'origine de la détérioration de la coque. Il arrive également que les hélices des navires soient endommagées par la charge de la glace qui plie une des pales. Enfin, le gouvernail peut aussi rompre quand le navire fait marche arrière.

8.3.1 - L'exemple de l'hiver 2002/2003

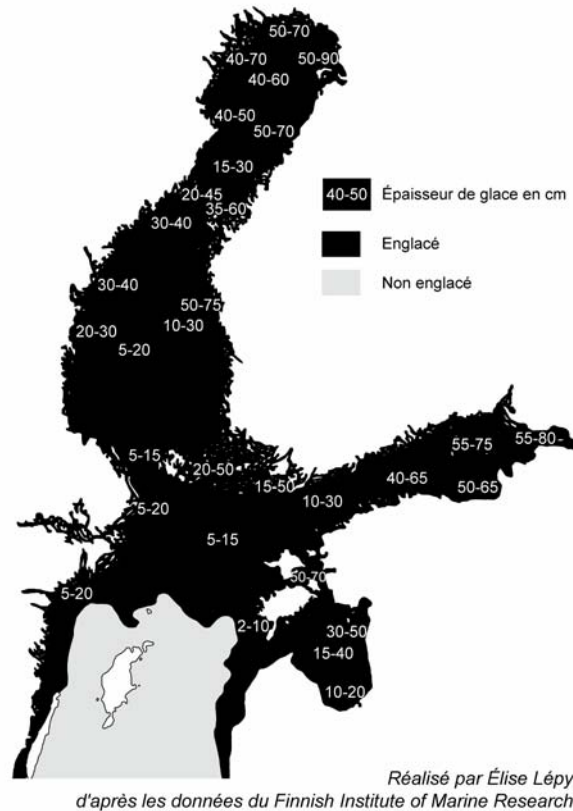
Lors de l'hiver 2002/2003, la navigation dans les glaces marines a connu beaucoup d'incidents et d'accidents en Mer Baltique. Il a été dénombré par les administrations maritimes et portuaires près d'une centaine de cas impliquant 111 navires (Hänninen, 2003, 10). Comparativement, l'hiver 2005/2006 n'a connu que trois accidents majeurs et les deux hivers suivants n'ont relevé que des dommages mineurs. Bien évidemment, les conditions glacielles sont à mettre en cause pour l'hiver 2002/2003.

La période de restriction la plus longue concernait alors les ports de la Baie de Botnie (Tornio, Kemi et Oulu), commençant le 19 novembre 2002 pour les bateaux de classe I et II au tonnage inférieur à 1000 dwt et s'achevant le 23 mai 2003.

8.3.1.1 - Description de l'hiver 2002/2003

Or on sait que l'hiver 2002/2003 en terme de couverture de glace a été moyen (232 000 km² en Baltique au 6 mars 2003). Il a été toutefois l'hiver le plus sévère de la décennie ce qui explique qu'il ait enregistré de nombreux incidents et accidents.

L'épaisseur de la banquise a ainsi atteint 88 centimètres sur la côte Est de la Baie de Botnie, 70 centimètres dans la Baie de Pärnu et 45 centimètres sur la côte Ouest du Golfe de Riga (graphiques 4 et tableau 8). De plus, la saison glacielle a été plus longue que la normale, de deux semaines à un mois selon les endroits (carte 35).

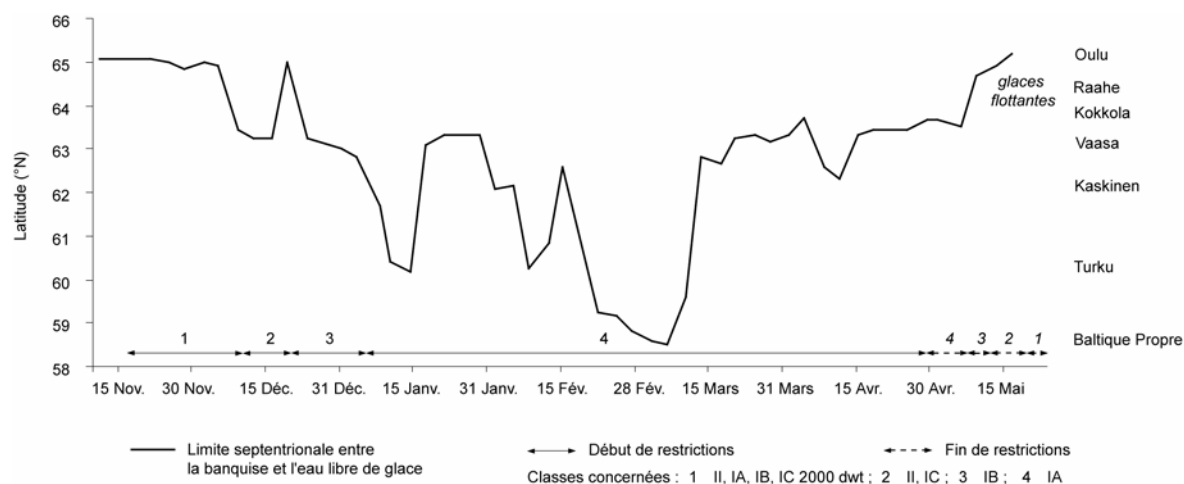


Carte 35 – Situation glacielle et épaisseur de glace en Mer Baltique le 6 mars 2003
 Map 35 – Sea ice situation and ice thickness in the Baltic Sea, March 6th 2003

De nombreuses vagues de froid sont apparues pendant l'hiver rendant plus sévères les conditions glacielles. En mars, des forts vents de Sud-Ouest ont permis à des crêtes de pression de se former et de rendre alors la navigation plus difficile dans le Golfe de Botnie.

8.3.1.2 - Les incidents et les accidents dans la Baie de Botnie et le Golfe de Riga durant cet hiver

En 2002/2003, sur les 98 cas d'accidents recensés en Mer Baltique, un peu plus de 15 % se sont déroulés dans la Baie de Botnie contre 10 % dans le Golfe de Riga. Beaucoup d'accidents se sont ainsi produits dans le Golfe de Finlande là où le trafic maritime est le plus développé. La plupart des navires impliqués étaient de classe IA ou IA Super (sauf trois d'entre eux de classe II). À cette période, les restrictions à la navigation (figure 15) ne permettaient en fait qu'aux navires de classe IA et supérieure d'atteindre le fond des golfes, imposées en particulier en fonction de la limite septentrionale des glaces pour atteindre le port d'Oulu (graphique 32). Dans les deux situations, les cargos polyvalents et les car-ferries ont été plus impliqués que les autres navires car ils étaient plus nombreux à naviguer.



Réalisé par Élise Lépy

Graphique réalisé à partir des cartes du Finnish Institute of Marine Research

Graphique 32 – Limite septentrionale (en latitude) des glaces de mer pour atteindre le port d'Oulu et les restrictions à la navigation pendant l'hiver 2002/2003

Graph 32 – Northern ice edge (in latitude) to get to Oulu harbour and navigation restrictions in 2002/2003

8.3.1.2.1 - Les causes des événements

Les erreurs techniques sont souvent à l'origine d'incidents et d'accidents en hiver. La principale en est la vitesse du navire pour les navires à puissance de propulsion élevée comparativement à leur taille. La proue est alors souvent endommagée. Les erreurs de manœuvre sont aussi d'assez nombreuses causes d'incidents : les évitements dans un port ou pendant l'assistance ou remorquage d'un navire par un brise-glace. Mais l'une des plus spectaculaires reste la collision entre deux navires se suivant, souvent quand les chenaux de navigation sont recouverts de glace : le premier navire se trouve bloqué dans les glaces et le second vient le heurter.

En définitive, les conditions naturelles, glacielles et météorologiques affectent la navigation hivernale. De forts vents peuvent engendrer des mouvements de la banquise se comprimant sur la coque et l'endommageant. La présence de crêtes de glace peut de plus endommager la coque et la cale du navire. Enfin, l'obscurité de la longue nuit hivernale et les fortes chutes de neige rendent aussi la navigation plus difficile.

8.3.1.2.2 - Les dommages subis (tableaux 23 et 24)

La détérioration des hélices est le dégât prédominant. L'incident survient souvent lors de manœuvres portuaires ou pendant une marche arrière. Par ailleurs, la collision (photographie 33) entre un cargo et le brise-glace qui l'assiste est le deuxième accident le plus répandu.

	Type	Ice class	Type de dommages	Contexte
3 Déc. 2002	cargo polyvalent	II	hélice	dans les glaces de mer
30 Janv. 2003	pétrolier / <i>brise-glace</i>	IA / -	collision	assistance
2 Fév. 2003	vraquier	IAS	hélice, coque	dans les glaces de mer
4 Fév. 2003	vraquier / <i>brise-glace</i>	IA / -	collision	assistance
10 Fév. 2003	cargo polyvalent / <i>brise-glace</i>	IA / -	collision	assistance
14 Fév. 2003	vraquier	IA	gouvernail	dans les glaces de mer
	cargo polyvalent	IA	moteur	dans les glaces de mer
26 Fév. 2003	cargo ferry	IAS	gouvernail	dans les glaces de mer
27 Fév. 2003	cargo polyvalent	IA	hélice	dans les glaces de mer
2 Mars 2003	cargo ferry	IA	coque, cale	dans les glaces de mer
20 Mars 2003	cargo polyvalent	IA	hélice	dans les glaces de mer
25 Mars 2003	cargo polyvalent	IA	hélice	dans les glaces de mer
10 Avril 2003	cargo ferry	IAS	gouvernail	dans les glaces de mer
22 Avril 2003	cargo polyvalent	IA	hélice	dans les glaces de mer
	vraquier	IA	coque	dans les glaces de mer

Tableau 23 – Incidents et accidents dans la Baie de Botnie pendant l’hiver 2002/2003

Table 23 – Incidents and accidents in the Bay of Bothnia in winter 2002/2003

(Source : Hänninen, 2003)

Date	Type	Ice class	Type de dommages	Contexte
5 Janv. 2003	cargo polyvalent	II	indéfini	dans les glaces de mer
25 Janv. 2003	cargo ferry	IA	hélice	dans les glaces de mer
14 Fév. 2003	cargo polyvalent	IA	collision	assistance
18 Fév. 2003	cargo ferry	IA	hélice	dans les glaces de mer
22 Fév. 2003	cargo polyvalent	II	hélice	dans les glaces de mer
2 Mars 2003	cargo ferry	IA	hélice	dans les glaces de mer
5 Mars 2003	cargo polyvalent	IA	collision	dans les glaces de mer
10 Mars 2003	cargo polyvalent	IA	collision	chenal
20 Mars 2003	cargo ferry	IA	hélice	chenal
1 ^{er} Av. 2003	remorqueur	IA	hélice, cale	dans les glaces de mer

Tableau 24 – Incidents et accidents dans le Golfe de Riga pendant l’hiver 2002/2003

Table 24 – Incidents and accidents in the Gulf of Riga in winter 2002/2003

(Source : Hänninen, 2003)

Les cas suivants illustrent ces fortunes de mer. Ainsi,

- le 2 février 2003, un vraquier naviguant entre les différents ports de la Baie de Botnie (Oulu, Pietarsaari, Vaasa) eut des problèmes d’hélice dus aux conditions glacielles difficiles dans le Quark.

- le 2 mars 2003, un navire transportant des passagers sur la ligne Vaasa – Umeå eut aussi un incident dans les glaces de mer du Quark. Les conditions glacielles y étaient assez difficiles du fait de vents de Sud. Le bateau navigua sur un tiers de son trajet dans le chenal de navigation puis dut affronter des empilements de glace et des crêtes formés par le vent : l’assistance d’un brise-glace devint alors nécessaire. Le voyage qui durait normalement six heures, a duré le double et coque et cale du bateau ont été endommagées.



Photographie 33 – Dommages à l'avant d'un vraquier après collision, Golfe de Finlande
 Picture 33 – Bulk carrier bow damages after collision, Gulf of Finland
 (Source : Swedish Maritime Administration)

8.3.2 - Solutions pour limiter les risques

Selon R. Jalonen et *al.* (2005, 149-150), limiter les risques d'implication d'un navire dans un incident ou accident repose sur trois points : tout d'abord, la restriction plus sévère voire totale des classes de navires IC et IB (enregistrant beaucoup d'avaries sur la coque) diminuerait le nombre d'incidents. D'autre part, l'assistance plus efficace des brise-glaces améliorerait la sécurité en mer. Le nombre de brise-glaces des flottes finno-suédoises devrait en conséquent être augmenté pour faire face aux interventions et diminuer le temps d'attente pour l'assistance. D'ailleurs, certains navires de la classe IA Super, malgré leur capacité théorique à naviguer seuls dans les glaces de mer, requièrent parfois un brise-glace. Enfin, un dernier point concerne une indispensable amélioration des prévisions météorologiques et des cartes de conditions glacielles.

8.4 - INFLUENCE DE LA NAVIGATION SUR LE COUVERT DE GLACE

On sait que les glaces de mer peuvent réellement entraver la navigation des cargos joignant les ports les plus profonds des golfes de la Mer Baltique. Mais cette relation n'évolue pas dans ce seul sens. En effet, des interactions existent entre milieu naturel, ici représenté par la banquise, et emprise anthropique. En effet, le trafic maritime a des impacts considérables sur le milieu marin baltique : la semi-fermeture de la Mer Baltique rend son environnement marin très sensible à la pollution et à tout changement

lié à l'augmentation du trafic maritime. Ainsi, le milieu aquatique de la Baltique, largement touché par le phénomène d'eutrophisation, est menacé par une hausse du trafic qui participe grandement à sa dégradation.

De plus l'hiver, le problème est différent. Le comportement des glaces de mer est influencé par le passage des navires qui fréquentent la Baltique.

D'après l'Allemand Klaus Strübing (2007, 68), la formation de la banquise en Mer Baltique ne résulterait pas seulement d'un phénomène naturel climatique. Le couvert de glace serait autant modifié par l'influence humaine que par le simple aléa climatique saisonnier. En effet, la navigation dans les glaces de mer déforme la banquise et influence son comportement. L'intensité de ce phénomène d'origine anthropique dépend naturellement du nombre de navires et de la fréquence des passages pour atteindre les ports. Ainsi, dans les espaces maritimes de superficie modeste comme le Golfe du Saint-Laurent au Canada ou en Mer Baltique, les milliers d'escales pendant la saison hivernale affectent considérablement le couvert de glace même si le trafic est limité par des chenaux de navigation. Traversée de part en part par les brise-glaces et les navires, la banquise se trouve morcelée en fragments se déplaçant ensuite dans plusieurs directions.

De nos jours, les plus puissants brise-glaces et navires naviguent dans des conditions glacielles très difficiles. Ils peuvent traverser la banquise côtière d'une épaisseur maximale de 1,20 mètre et forcer certaines crêtes de glace. Ils modifient ainsi le niveau du couvert de glace en transformant les floes en pancakes et les pancakes en plus petits glaçons. De plus, le trafic parallèle à la côte favorise l'ouverture de chenaux ou la formation de crêtes de glace selon les conditions éoliennes. Par conséquent, la navigation hivernale artificialise de manière dynamique le comportement des glaces de mer. Ce fait serait par conséquent à prendre désormais en compte dans les modèles météomaritimes hivernaux de gestion de la circulation maritime.

La banquise, un risque sociétal ?

Pratiquer une activité professionnelle ou de loisir sur la banquise induit inévitablement un risque. Moins nombreux que ceux que l'on observe habituellement sur la mer libre, des incidents et accidents ont malgré tout lieu chaque hiver sur les eaux prises en glace de la Mer Baltique. De plus, la banquise est un espace temporaire et mouvant qui, pendant ses phases de changements d'état de l'eau, rend davantage vulnérables les personnes s'y aventurant.

De nos jours, on sait que le risque est une préoccupation croissante pour nos sociétés exposées à des menaces diverses naturelles ou anthropiques. Cette notion complexe et pluridisciplinaire a pris sa place dans les recherches géographiques depuis les années 1980, le risque étant intégré dans une approche globale au cœur des relations nature et sociétés. Yvette Veyret (2003, 16) définit le risque comme une « *perception du danger possible, plus ou moins prévisible par un groupe social ou un individu qui est exposé* ». Ceci implique l'étude des relations entre les sociétés et leur environnement et des rapports qu'elles ont avec l'espace supposé à risque. Le risque résulte ainsi de la combinaison d'un aléa, facteur externe et produit d'un environnement qui, s'il est naturel, peut être modifié par l'action humaine, avec la vulnérabilité des sociétés qui prend en compte la fragilité d'un système et sa capacité à réguler la crise provoquée par l'aléa (Veyret, 2004, 32 ; Morel et al., 2006, 8).

Dans notre cas d'étude, l'aléa (figure 17) a comme support un environnement naturel, la banquise. D'autre part, la vulnérabilité des sociétés riveraines de la Mer Baltique dépend grandement de leur exposition aux risques occasionnés par la banquise. Elle correspond à la pratique d'activités en mer gelée.

Pour gérer ces risques, les réponses se manifestent par deux composantes : la prévention et la protection. La prévention a pour objectif de développer la capacité à prendre les mesures et précautions nécessaires face au danger éventuel ou mieux encore à l'éviter en informant au préalable les populations. La protection relève du travail des agents garde-côtes et des administrations maritimes et portuaires (restrictions à la navigation). La gestion des risques et des accidents en mer gelée influe ainsi sur l'aménagement territorial et l'organisation spatiale du milieu littoral.

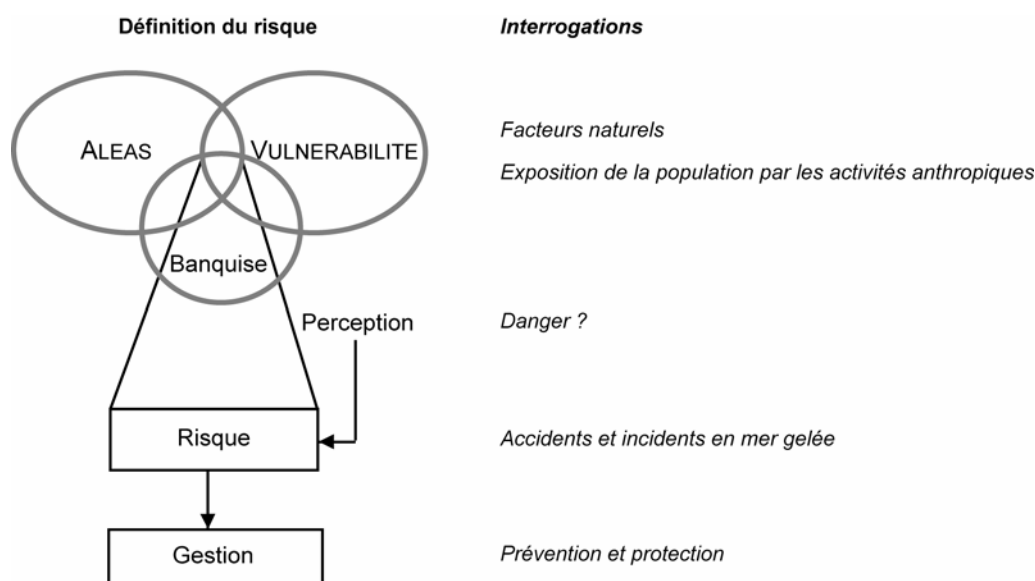


Figure 17 – Définition du risque et les interrogations suscitées
 Figure 17 – Risk notion and related questions

Au cours des chapitres précédents, on s’est rendu compte que les populations finlandaises et lettones³⁸ ne portaient pas le même intérêt et attachement à la banquise. Le fait que ces deux sociétés soient différentes par leurs modes de vie, leur histoire, leur culture amène bien entendu à s’interroger sur leur vulnérabilité face à un phénomène naturel saisonnier. Les glaces de mer représentent-elles un risque pour les sociétés riveraines de la Baltique ? S’il existe, est-il semblable en Baie de Botnie que dans le Golfe de Riga ? Dans tous les cas, le caractère plus ou moins attractif de la banquise, a un impact évident sur la mise en valeur de l’espace marin.

9.1 - ALEAS ET VULNERABILITE

L’aléa est un « événement possible qui peut être un processus naturel, technologique, social, économique » (Veyret, 2003, 16) potentiellement dangereux dont on essaie d’estimer l’intensité (Morel, 2006, 7). Rappelons que l’environnement naturel des deux sites, les littoraux d’Oulu et de Riga, est assez peu différent puisque, dans le premier cas, la probabilité d’occurrence du gel de la mer est plus élevée, que la saison glacielle est plus longue et que l’épaisseur de glace est plus importante que dans le second cas. Les conditions glacielles contrastées donnent donc lieu à une intensité et une probabilité d’occurrence inégales des facteurs naturels donc de leurs aléas dans les deux sites. L’analyse des données collectées auprès des autorités locales en Baie de Botnie a permis

³⁸ On entend ici par « population lettone », les personnes qui vivent en Lettonie qu’elles soient lettones ou russes.

de dresser une liste des causes naturelles susceptibles de conduire au risque voire à l'accident en mer gelée (tableau 25).

Les aléas météorologiques sont de loin les plus fréquents, ils correspondent souvent à un changement soudain du temps qui peut compromettre la fiabilité de certaines données prévues ou mesurées. Ces aléas météorologiques telle la levée du vent peuvent avoir des conséquences imprévisibles et terribles sur les conditions glacielles. Les aléas d'origine glacielle sont également nombreux puisqu'ils concernent aussi bien les déformations du couvert de glace (ouverture du pack de glace, formation de murs de glace et de neige) que des changements de caractéristiques des différentes couches glacielles qui composent la banquise (présence d'eau, ramollissement d'une couche). Enfin, des facteurs naturels qui font partie intégrante de l'environnement naturel pendant la période hivernale comme la courte durée du jour – de quatre heures dans la Baie de Botnie en janvier – et l'immensité de l'espace gelé sont à prendre en compte dans les risques encourus. Tous ces éléments peuvent être à l'origine de certains problèmes sur la banquise.

Des facteurs naturels qui peuvent amener au risque	
Aléas météorologiques	<ul style="list-style-type: none"> • baisse des températures • formation du brouillard • vents forts qui peuvent modifier grandement les conditions glacielles
Aléas d'origine glacielle	<ul style="list-style-type: none"> • fractures du pack (souvent liées au vent) • présence d'eau libre due aux courants • déformation du couvert de glace : formation de crêtes de glace et de congères • présence d'une couche d'eau entre deux couches de glace • la glace « molle » même si elle est épaisse au printemps • changement de niveau d'eau
Facteurs géographiques généraux	<ul style="list-style-type: none"> • la courte durée du jour : le coucher du soleil vers 14h au 65°N en janvier • l'immensité désertique de l'espace

Tableau 25 – Récapitulatif des facteurs naturels pouvant produire un risque
 Table 25 – Summary of natural factors responsible of a risk

La question de la vulnérabilité est plus complexe puisqu'elle fait intervenir les enjeux sociétaux face à l'aléa. Ces enjeux peuvent s'exprimer au niveau des personnes, des biens, des équipements qui, menacés par l'aléa, sont susceptibles de subir des torts et des dommages (Veyret, 2003, 16). La vulnérabilité exprime alors le niveau d'effet prévisible du phénomène naturel sur la société. L'exposition à l'aléa rend donc inévitablement un individu ou une société vulnérable. Or nous avons vu, dans les chapitres précédents, que

l'exposition des deux populations différerait d'un site à un autre. Effectivement, plus de 87% des personnes interrogées à Oulu pratiquent une activité sur la banquise alors que seuls 47% y sont recensés à Riga – la plupart se limitant à la marche sur le rivage.

Considérer la banquise comme un espace de loisir où il est possible de pratiquer diverses activités à ski, en motoneige, en automobile ou encore à pied, implique nécessairement une exposition plus forte à un danger probable. L'accessibilité à des lieux lointains du rivage et le parcours de longues distances sur la banquise accentuent également la vulnérabilité des individus. Enfin, la négligence à l'égard du matériel transporté (incident mécanique, panne d'essence...), le non-respect des règles de conduite sur la banquise et l'inobservation des conseils donnés par les autorités locales (fournir un plan de route pour les excursions sur la mer gelée avec horaires...) contribuent fortement à l'exposition au danger.

Les aléas météo-marins associés à l'exposition des populations sont donc susceptibles d'engendrer un risque pour ces individus. Mais les divergences de comportements et de modes de vie des sociétés finlandaises et lettones ne les exposent pas aux mêmes risques ou tout du moins à la même intensité de tels dangers. Mais le risque ne résulte pas que de la combinaison d'un aléa avec des enjeux, il dépend aussi de celui qui le perçoit. Il est un « *construit social, une perception qui varie selon les groupes et les individus* » (Veyret, 2004, 29).

9.2 - LA PERCEPTION DU DANGER

L'exposition d'une société à un aléa qui peut être source de danger, ne suffit pas si elle n'est pas combinée à la perception de ce danger par un individu ou une population. Le risque dépend donc de celui qui le perçoit. Pour Y. Veyret (2003, 3) ce dernier est « *la traduction d'une menace, d'un danger pour celui qui lui est soumis et le perçoit comme tel* ».

Pour savoir concrètement si la banquise représente un risque sociétal, il est donc nécessaire de comprendre les représentations mentales du risque en mer gelée. Ces représentations peuvent être influencées par différents facteurs d'ordre social, culturel et autre. Le risque peut alors résulter d'une « lecture » différente d'une même situation par deux individus. Face à une même situation environnementale, deux populations peuvent percevoir le danger de différentes manières. La perception d'un risque potentiel est un phénomène complexe déjà décrit dans diverses études (Dake, 1991, 1992 ; Vaughan et Nordenstam, 1991, Kouabenan, 2009). Elle peut être déterminée par un seul individu ou un groupe d'individus dont l'histoire, le vécu et l'expérience sont à prendre en compte.

La question qui se pose ici est de comprendre, dans un premier temps, comment les sociétés finlandaises et lettones perçoivent la banquise. Représente-t-elle un espace

dangereux pour les individus qui s’y aventurent ou est-elle un espace auquel ils s’adaptent saisonnièrement sans aucune crainte ? Il s’agit également de déterminer les facteurs propres à chaque individu et plus largement à une population qui expliquent les différences existantes dans l’appréciation de l’aléa et dans la perception du danger.

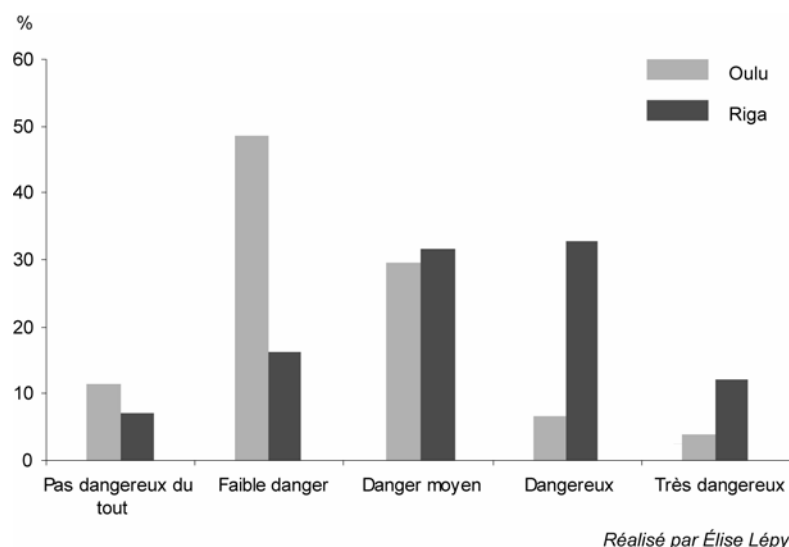
9.2.1 - La banquise, un espace dangereux ?

La différence de présence humaine et d’activités pratiquées sur la banquise entre le site d’Oulu et celui de Riga, laisse supposer des divergences de représentations de cet espace marin en hiver. Les observations lors des diverses missions sur les deux sites conduisent à l’hypothèse que la population finlandaise perçoit la banquise comme faiblement dangereuse, contrairement aux Lettons qui ne la fréquentent peu et la craignent.

Afin de confirmer ou de rejeter cette hypothèse, on a exploité ici les résultats de l’enquête menée auprès des populations littorales des régions d’Oulu et de Riga. En effet, l’un des objectifs de cette enquête était de se rendre compte de la dangerosité de la mer gelée perçue par les deux populations. La question posée « Pensez-vous que la banquise peut représenter un danger ? » offrait cinq niveaux de réponses « pas dangereux du tout », « faible danger », « danger moyen », « dangereux » et « très dangereux » avec une seule et unique réponse possible.

Il ressort de cette étude des résultats divergents selon la population concernée. Effectivement, plus de 60% de la population d’Oulu perçoivent la mer gelée comme un espace à faible danger, voire pas dangereux du tout, alors que seulement 10% de cette même population la considère comme dangereuse voire très dangereuse. Du côté letton, les chiffres sont tout autres puisque 45% de la population interrogée pensent que la banquise est potentiellement dangereuse voire très dangereuse et seulement 23% y voient un danger minime. Le graphique 33 illustre ces divergences de perception.

Il révèle une divergence assez nette sur la question de la dangerosité. Il semble bien clair que les deux échantillons d’individus présentent des avis contraires. Il semble donc opportun d’analyser les facteurs explicatifs à deux niveaux d’échelle : il s’agit d’étudier dans chaque échantillon les caractéristiques qui sont propres à chaque individu et qui auraient donc une influence sur leur perception ; puis il est important de considérer les deux groupes en tant qu’entités sociétales représentatives des caractéristiques propres aux sociétés finlandaises et lettones.



Graphique 33 – Perception du danger en mer gelée des populations d'Oulu et de Riga
 Graph 33 – Sea ice danger perception from Oulu and Riga populations

9.2.2 - Les facteurs

9.2.2.1 - Les caractéristiques individuelles

La perception du risque est affectée par des caractéristiques propres à chaque individu. On s'est ainsi demandé si l'exercice d'une profession en relation avec la mer d'une part, et le vécu et l'expérience de la banquise qui se traduisent par la fréquentation et le nombre d'accident d'autre part, peuvent être des raisons explicatives aux différentes perceptions du danger sur la banquise.

9.2.2.1.1 - Le milieu professionnel

L'enquête s'est demandée si les individus étaient professionnellement en relation avec le milieu marin³⁹. L'analyse bivariée des deux variables qualitatives « profession en relation avec le milieu marin » et « perception du danger » a révélé dans les deux cas, Oulu et Riga, que pour un risque d'erreur de 5%, ces deux variables ne sont pas liées. En revanche, dans le cas de Riga, le test du Khi Deux de Pearson⁴⁰ rejette l'hypothèse d'indépendance des deux variables pour un risque d'erreur de 10%. Toutefois, la liaison n'est que faiblement significative puisque le coefficient de Tschuprow⁴¹ calculé est de 0,20.

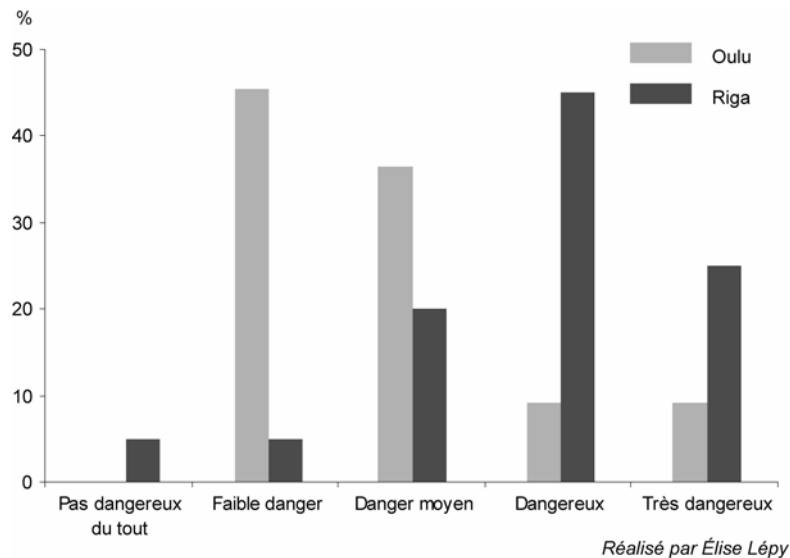
³⁹ Quant tel est le cas, les domaines concernées sont majoritairement celui de la pêche, des ports, des administrations maritimes ou encore de la recherche, en biologie marine par exemple.

⁴⁰ La loi de probabilité du Khi Deux de Pearson permet de confirmer ou d'infirmer avec un seuil de sûreté choisi, une hypothèse faite sur un phénomène aléatoire. Le Khi Deux vérifie la dépendance de deux variables.

⁴¹ Le coefficient de Tschuprow vérifie l'intensité de la liaison entre deux variables et est compris entre 0 et 1 : plus il est proche de 1, plus le lien est fort.

En résumé, la liaison entre la profession en lien avec la mer et la perception du danger sur la banquise existe à Riga, sans être très significative, mais elle est absente pour Oulu.

La liaison entre les deux variables étant peu significative, on s'est intéressé aux seuls individus professionnellement en relation avec la mer. Le graphique 34 illustre le pourcentage de ces individus pour chaque niveau de perception du danger. Une nouvelle fois, les deux groupes s'opposent : alors que près de 80% de ces individus conçoivent la mer englacée comme un espace où le danger est moyen voire faible à Oulu, 70% la qualifient de dangereuse voire très dangereuse à Riga.



Graphique 34 – Perception du danger en mer gelée des personnes travaillant en relation avec la mer à Oulu et Riga

Graph 34 – Sea ice danger perception from persons working in the sea field in Oulu and Riga

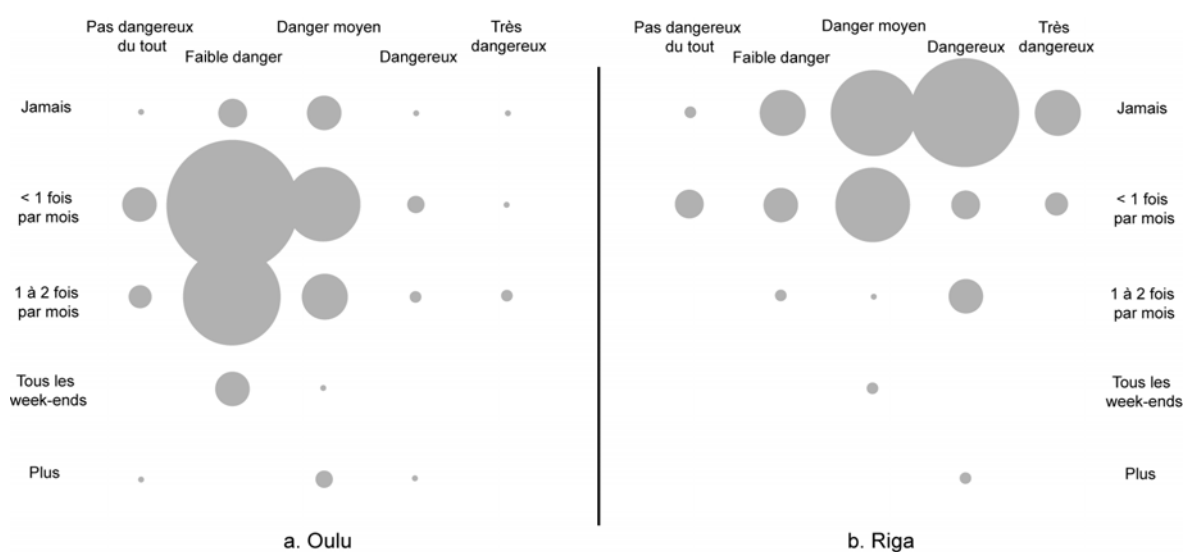
9.2.2.1.2 - L'expérience « vécue » de la banquise

Il est indispensable de formuler l'hypothèse selon laquelle la perception du risque dépend du vécu et de l'expérience de chaque individu face à cet espace. L'expérience de la banquise peut ainsi s'évaluer de deux manières : la fréquentation de cet espace en saison hivernale et l'implication ou non de chaque individu dans un accident ou incident en mer gelée. Le fait de pratiquer une activité sur la glace de mer de façon régulière a-t-il une incidence sur le risque perçu ? Avoir été impliqué dans un accident en mer gelée accentue-t-il l'idée de dangerosité que représentent les glaces de mer ?

Malgré l'ambiguïté de compréhension qui s'est probablement produite pour la question portant sur la fréquence des activités pratiquées sur la banquise à Riga, on a quand même mené l'analyse bivariée de cette variable avec celle de la perception du

danger. De nouveau, le test d'indépendance est vérifié pour Oulu, alors que les deux variables semblent être liées pour un risque d'erreur de 10% dans le cas de Riga. Mais encore une fois le coefficient de Tschuprow ($T=0,24$) révèle que cette liaison est faiblement significative.

Les deux cartogrammes suivants (figure 18) illustrent le pourcentage d'individus au croisement de ces deux variables. Ainsi, à Oulu les valeurs les plus fortes concernent les fréquentations moyennes (inférieure à une fois par mois et une à deux fois par mois) et la perception d'un danger faible. Du côté letton, il est indéniable qu'un bon pourcentage des personnes qui ne fréquentent jamais la banquise la perçoivent comme dangereuse.



Réalisé par Élise Lépy

Figure 18 – Relation entre la fréquentation de la banquise et la perception du danger
 Figure 18 – Relation between sea ice frequentation and danger perception

Par ailleurs, près de 7% des personnes interrogées à Oulu et 13% à Riga, ont déjà eu un incident ou accident sur la banquise. La question est de savoir si l'implication d'un individu dans un accident modifie sa représentation des glaces de mer. De la même manière que pour les deux tests précédents, le test de Pearson n'établit pas de lien à Oulu. Or à Riga, l'indépendance est rejetée pour un risque d'erreur de 10 % malgré une faible significativité de la liaison révélée par le coefficient de Tschuprow ($T=0,21$).

D'autre part, évaluer le pourcentage des différents niveaux de perception du danger des personnes impliquées dans un accident a peu d'intérêt dans le sens où les deux échantillons ne regroupent que très peu d'individus.

En résumé, aucun lien n'a pu être établi entre les caractéristiques propres à chaque individu et la perception du danger à Oulu. En revanche à Riga, malgré une

significativité faible, des liaisons sont existantes. À Oulu, aucun groupe ne se dégage de ces statistiques. Une fréquentation accrue de la banquise n'induit en rien une bonne perception. Ainsi d'autres facteurs rentrent en compte tels l'information sur les risques encourus qui est satisfaisante à Oulu. Une population préparée au risque et qui en a connaissance ne perçoit donc pas le risque de la même manière. Au contraire à Riga, la crainte de cet espace est impliquée pour expliquer l'infime partie de la population qui pratique une activité sur la banquise. Elle le considère comme dangereux. Il est donc évident que d'autres facteurs interviennent dans la représentation de cet espace marin. Des caractéristiques particulières aux deux sociétés peuvent effectivement s'immiscer dans l'interprétation des résultats.

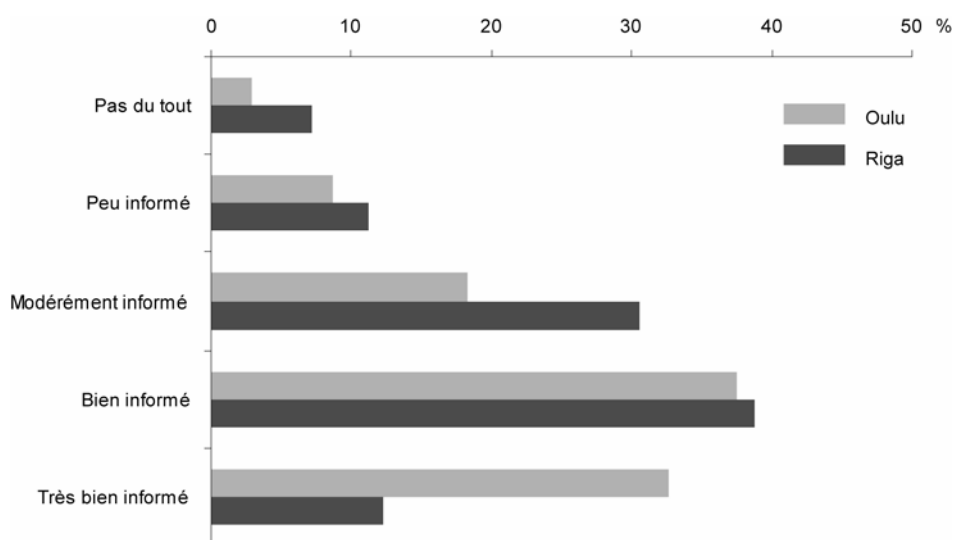
9.2.2.2 - *Les caractéristiques sociétales*

Le risque peut être perçu communément au sein d'un groupe. Dans notre étude, les deux sociétés finlandaise et lettone se distinguent par leurs propres caractéristiques historiques et culturelles. Les différentes perceptions et comportements face au danger reflètent alors leurs modes de vie et d'action. Bien que ces divergences soient déterminées par des facteurs sociaux, physiques, politiques et culturels, deux raisons influent fortement sur les représentations du risque : le facteur culturel, principal facteur, et, de toute évidence la diffusion de l'information sur les risques éventuels.

Effectivement, le facteur culturel peut expliquer les différentes perceptions et interprétations du risque (Douglas et Wildavsky, 1982 ; Oltedal et *al.*, 2004 ; Veyret, 2003). Dans notre cas d'étude, l'ethnicité apparaît alors comme le facteur d'explication le plus probable et le plus persuasif. La culture d'une société reflète son passé historique, ses valeurs, ses coutumes et mœurs. Alors bien sûr, les liens tissés entre les Finlandais d'une part, et les Lettons d'autre part, à la banquise sont inégaux. Ainsi, les Finlandais définissent la banquise côtière de la Baie de Botnie comme un espace de loisirs où toute sorte d'activités peuvent être pratiquées. En revanche, les Lettons évoquent celle du Golfe de Riga plutôt dans un contexte de crainte, un espace sur lequel on ne s'aventure peu ou pas car trop risqué. D'un point de vue historique, l'hypothèse selon laquelle il était interdit de se déplacer sur la banquise du Golfe de Riga pendant l'époque soviétique, est à émettre. Des traces de pas sur le couvert neigeux auraient été ainsi faciles à identifier.

Par ailleurs et de toute évidence, le manque de communication sur les risques encourus et les moyens pour les surmonter accentue la perception du danger. Ainsi, plus de 70% des personnes interrogées à Oulu et 50% à Riga considèrent être bien informées voire très bien informées des risques encourus en mer gelée (graphique 35). La diffusion des informations sur les risques et la communication entre les agents garde-côtes et la population locale sont davantage développées en Finlande qu'en Lettonie. Il faut dire qu'à Riga, 46%, soit près de la moitié de la population, souhaiteraient recevoir de plus

amples informations sur les risques et les dangers de la banquise. Alors qu'à Oulu où le danger est faiblement perçu, plus de 70% de la population interrogée considèrent être suffisamment informés. La question de la communication médiatique et également éducative sera abordée en fin de chapitre.



Réalisé par Élise Lépy

Graphique 35 – L'information sur les risques encourus en mer gelée
 Graph 35 – Information about risks on sea ice

9.2.3 – Conclusion partielle

L'enquête effectuée auprès des populations finlandaises et lettones riveraines de la Baie de Botnie et du Golfe de Riga a révélé de forts contrastes dans la perception du danger que peut représenter la banquise en période hivernale. Alors que la population de Riga est plutôt réticente à la pratique d'une quelconque activité sur la banquise qu'elle qualifie de dangereuse, la population d'Oulu la considère comme un espace de loisirs au faible danger. Les fréquences dissemblables de glaciellisation des eaux des deux sites ainsi que les facteurs socio-culturels contrastés expliquent largement ces disparités.

La prise en compte des citoyens dans l'étude du risque est croissante (Morel et al., 2006, 15) ; elle se traduit par la considération de leur perception du danger et par l'éducation aux risques *via* la communication (cf. fin de ce chapitre). Les perceptions du danger ont une implication incontournable sur la gestion du risque et la prévention des accidents.

9.3 - LES INCIDENTS ET ACCIDENTS EN MER GELEE

Les incidents et accidents en période hivernale correspondent à environ 10% des accidents enregistrés sur une année entière en Baie de Botnie. Même si cela ne représente qu'un faible pourcentage, on n'en recense pas moins d'une dizaine de cas, tous les hivers, dans le domaine maritime de la garde côtière d'Oulu, c'est-à-dire de Tornio à Kalajoki (carte 36).

Les informations se rapportant aux incidents et accidents en période glacielle sur les eaux territoriales de la Baie de Botnie et d'une partie du Golfe de Botnie (domaine maritime de la garde côtière de Vaasa) ont été recueillies auprès de la station des garde-côtes de Virpiniemi. Malgré une recherche assidue dans les archives et auprès du MRSC (*Maritime Rescue Sub Centre*) de Vaasa, seules quelques années ont pu être rassemblées, en nombre suffisant toutefois pour avoir une vision suffisante des types d'accident rencontrés sur la banquise, de leur quantité et de leur localisation pendant les périodes 1990-1994 et 1999-2001.

Aucune statistique concernant le Golfe de Riga sur les accidents en mer gelée ne nous a été délivrée, certainement par volonté de ne pas révéler l'information. Malgré cette lacune, le capitaine du Port de Riga, lors d'un entretien du 23 mars 2006, a signalé qu'il préférerait voir les eaux du Golfe de Riga prises en glace plus souvent pour que le nombre d'accidents en mer diminue. Effectivement, la part des accidents en mer gelée est moindre par rapport au nombre d'accidents rapportés sur l'année entière.

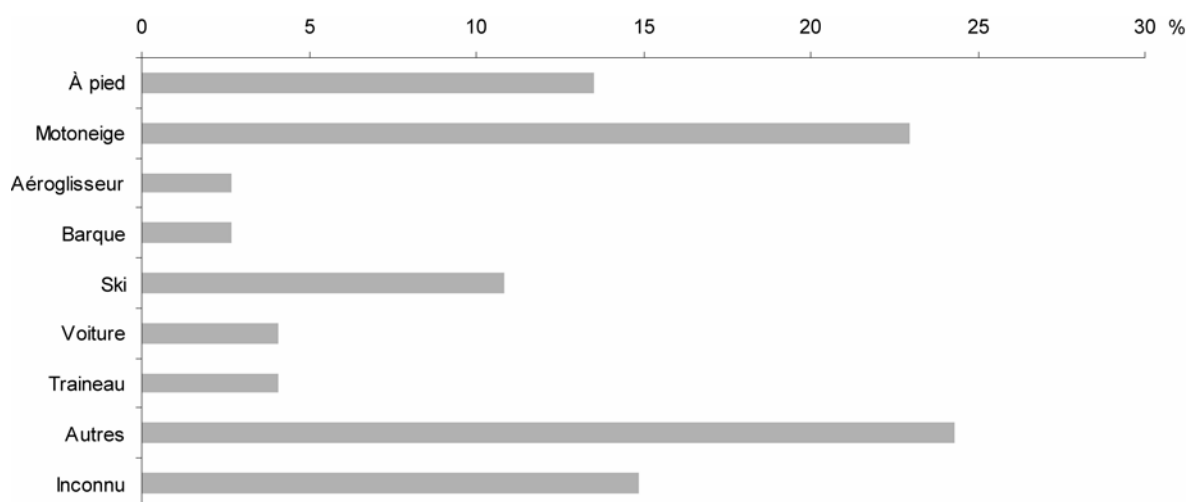
Toutefois, d'après notre enquête intitulée « fréquentation de la banquise », 13,3% des personnes interrogées à Riga ont déjà eu un incident ou accident sur la banquise contre seulement 6,8% des personnes interrogées aux alentours d'Oulu. À défaut d'avoir des données valables pour le Golfe de Riga, notre étude se focalise donc ici sur les incidents et accidents encourus sur la banquise de la Baie de Botnie.

Les garde-côtes de la station de Virpiniemi interviennent en moyenne une dizaine de fois tous les hivers dans le cadre de recherche et de sauvetage en mer gelée impliquant également une dizaine de personnes (tableau 26). Au cours des deux périodes d'étude, le nombre d'intervention a été de 74 pour huit hivers. Bien entendu, le nombre annuel varie en fonction de la sévérité et de la longévité de la saison glacielle. La période d'intervention en mer gelée est donc variable d'une année à l'autre sachant que sont considérés dans notre étude les incidents et accidents survenus également pendant les périodes d'embâcle automnal et de débâcle printanière.

	1989-90	1990-91	1991-92	1992-93	1993-94	1998-99	1999-2000	2000-01	Total
Nombre d'incidents / accidents	9	9	6	7	13	5	10	15	74
Nombre de personnes impliquées	11	13	6	16	14	5	10	18	93

Tableau 26 – Nombre d'incidents et accidents et de personnes impliquées entre 1990 et 2001 dans le domaine maritime de la garde côtière d'Oulu
Table 26 – Number of incidents and accidents and persons involved between 1990 and 2001 in the maritime area of Oulu Coast Guard

Les causes des incidents et accidents survenus sur la banquise du domaine maritime de la garde côtière d'Oulu dépendent étroitement des activités et des moyens utilisés pour les pratiquer. Le graphique 36 présente le pourcentage des incidents et accidents par moyens utilisés. Ainsi, 23% des incidents et accidents impliquaient des motoneiges, 13,5% des promeneurs ou des pêcheurs à pied et 10,8% des skieurs au cours des deux périodes étudiées. Le nombre de voitures, traîneaux, aéroglisseurs et barques impliqués est minime, mais les dégâts peuvent alors parfois être considérables. D'autre part dans ce graphique, on entend par « autres » des interventions qui concernent principalement des tirs de fusées de détresse ou d'autres accidents ne mettant pas en cause la vie de personnes.



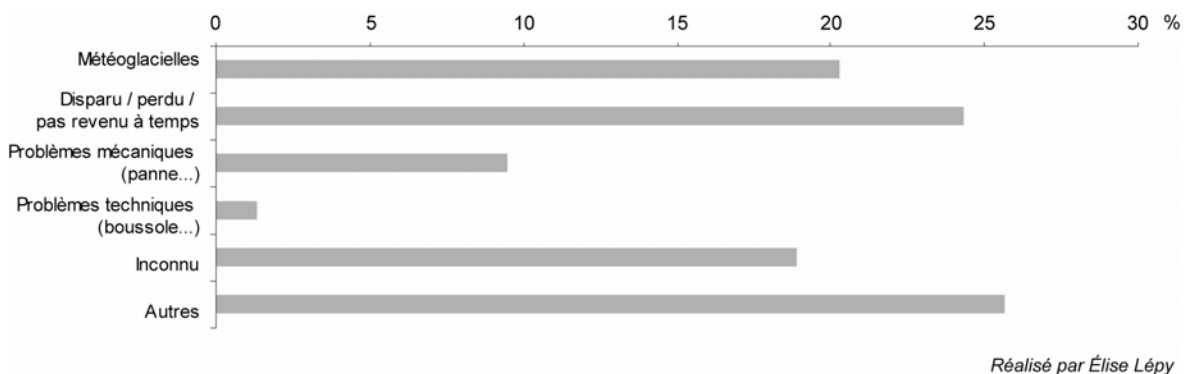
Réalisé par Élise Lépy

Graphique 36 – Pourcentage d'incidents et d'accidents par moyen utilisé entre 1990 et 2001 dans le domaine maritime de la garde côtière d'Oulu⁴²
Graph 36 – Percentage of incidents and accidents by transportation between 1990 and 2001 in the maritime area of Oulu Coast Guard

⁴² Les pourcentages correspondent au moyen utilisé par incident et accident. Dans le cas d'un accident impliquant deux motoneiges, le moyen motoneige est comptabilisé une seule fois.

D'après ces résultats, les activités les plus pratiquées sur la banquise tels les safaris en motoneige, le cross-country à ski ou encore la marche sont les plus accidentogènes en mer gelée. Par ailleurs, les causes d'un incident ou d'un accident sont multiples. D'après le graphique 37, elles concernent principalement l'égarement et le retard des individus dont l'origine n'est pas déterminée. Effectivement, l'immensité de la banquise, la faible durée du jour, des conditions météorologiques défavorables ou encore des problèmes techniques comme le dysfonctionnement d'une boussole ou d'un GPS peuvent conduire des individus à s'égarer.

Les conditions météoglacielles sont aussi une cause importante d'interventions des garde-côtes (plus de 20%). Une tempête de neige soudaine, la tombée du brouillard ou une baisse des températures sont autant de facteurs météorologiques qui participent à la survenue d'un incident (égarement, véhicule immobilisé dans des congères...). Des changements de conditions glacielles associées à de mauvaises conditions météorologiques peuvent être encore plus redoutables : la glace de dérive peut isoler et embarquer des individus (photographie 34) jusqu'à provoquer la noyade ; une couche peu épaisse de glace peut s'écrouler sous le poids de motoneiges qui coulent ou des motoneiges peuvent être immobilisées dans l'eau reglacée des chenaux de navigation ; ou des embarcations peuvent être bloquées par les glaces pendant la fonte printanière.



Graphique 37 - Les causes des incidents et accidents entre 1990 et 2001 sur la banquise du domaine maritime de la garde côtière d'Oulu

Graph 37 - Incident and accident causes between 1990 and 2001 on sea ice in the maritime area of Oulu Coast Guard

À côté des aléas météoglaciels, des complications dues à la négligence des individus peuvent survenir, souvent en relation avec des problèmes mécaniques (9,5%) (telles les pannes de moteur des motoneiges) ou des pannes d'essence. Dans certains cas, l'individu en difficulté tente de joindre la côte en marchant, mais souvent il fait face à l'égarement et à l'épuisement. Ce genre d'incident peut être fatal puisqu'un cas a recensé un homme qui, après avoir abandonné sa motoneige, a marché en cercle sur 16 kilomètres

puis a succombé au froid et à la fatigue⁴³. Bien entendu, certaines pannes techniques mentionnées auparavant comme le dysfonctionnement d'une boussole ou d'un GPS interviennent dans de nombreux incidents.

La mauvaise condition physique des individus est également une source de danger. Il est arrivé que des personnes skiant pendant plus de 50 kilomètres sur la banquise tombent soudainement en syncope.

Le plus souvent les individus s'aventurent non loin de la côte et pratiquent leurs activités sur la banquise côtière. La carte 36 montre la distribution spatiale des accidents et incidents par moyen de déplacement dans le domaine maritime de la garde côtière d'Oulu entre 1990 et 2001. Beaucoup d'incidents ont lieu au large des centres urbains comme Kemi, Oulu et Raahen. Ils se déroulent en général du rivage à une dizaine de kilomètres de la côte voire, dans certains cas, à une vingtaine de kilomètres.

Il arrive cependant que certaines personnes partent pour des périples de quelques jours sur les eaux gelées de la Baie de Botnie partant d'Oulu pour rejoindre Kemi, ou allant à ski sur différentes îles. Certains tentent même de traverser la Baie ce qui paraît assez difficile du fait de la présence des quelques chenaux de navigation entretenus par les brise-glaces. Un article du journal *Haparandabladet* du 14 mars 2006 (annexe 17) relate l'expérience de deux Espagnols qui, voulant expérimenter la glace et le froid, ont décidé de partir à ski de Luleå en direction de Tornio. Ils ont passé trois nuits sur les glaces de la Baie de Botnie sous une tente avec des températures inférieures à -22°C. Finalement mal équipés, les deux skieurs n'ont pas pu résister au froid et ont dû faire appel à des secours.

Autre exemple : le 10 mars 2008, un convoi de trois motoneiges a eu un incident sur la banquise entre l'île de Kropsu et la côte d'Haukipudas. Au cours de leur périple, les personnes ont dû faire face au chenal de navigation, qui relie Oulu à Kemi, reglacé après le passage d'un navire. Elles ont pensé pouvoir le traverser et l'une des motoneiges est restée bloquée dans les glaces prête à couler (photographie 35).

D'autres accidents et incidents survenus sur la banquise de la Baie de Botnie sont mentionnés en annexe 18.

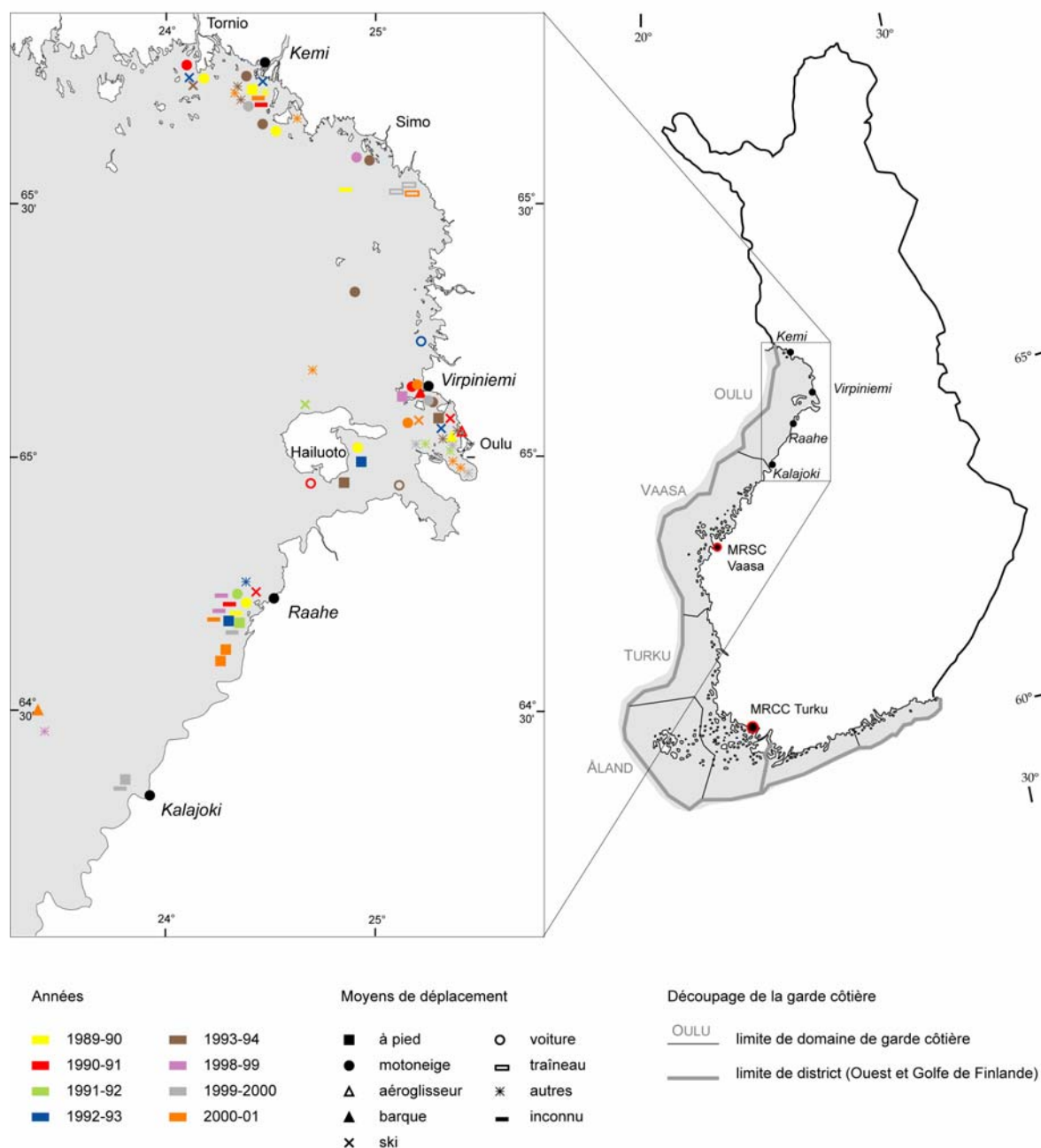
⁴³ D'après des anecdotes évoquées par des agents de la garde-côtière de Virpiniemi lors de l'entretien du 19 mars 2007.



Photographie 34 – Individus isolés sur un bloc de glace en dérive
Picture 34 – Isolated persons on drift ice
(Source : Finnish Border Guard)



Photographie 35 – Motoneige bloquée dans les glaces – Mars 2008
Picture 35 – Snowmobile stuck in the ice – March 2008
(Source : Finnish Border Guard)



Carte 36 – Distribution spatiale des accidents et incidents par moyen de déplacement sur la banquise du domaine maritime de la garde côtière d'Oulu entre 1990 et 2001

Map 36 – Spatial distribution of accidents and incidents by transportation type on sea ice in the maritime area of Oulu Coast Guard between 1990 and 2001

Les résultats présentés ci-dessus relèvent des données collectées et fournies par la garde côtière de Finlande après intervention. Par ailleurs, de nombreux autres incidents ont sans doute eu lieu mais n'ont pas été comptabilisés puisque les personnes en difficulté ont fait aussi appel à leurs proches – grâce à la téléphonie mobile – sans alerter les secours officiels. D'autre part, ces statistiques ne prennent pas en compte non plus les accidents de

navigation précédemment cités. Il est de fait souvent difficile d'assurer l'exactitude des statistiques sur les problèmes encourus en mer gelée.

Inévitablement, face à ces incidents et accidents, les garde-côtes ont le devoir d'informer et de prévenir la population locale des risques mais également donner des recommandations à suivre dans le cas d'un périple en mer gelée.

9.4 - LA GESTION DU RISQUE ET DE L'ACCIDENT

La gestion du risque repose avant tout sur la prévention. Informer des dangers et donner des recommandations à la population constituent l'une des missions prioritaires des autorités locales. La plupart du temps, elles sont effectuées par les garde-côtes.

La Finlande dispose de 26 stations de garde-côtes dont les tâches premières sont le contrôle frontalier en mer et la sécurité civile maritime. Les opérations de recherche et de sauvetage ont une place importante au sein des activités des garde-côtes. La garde côtière de Finlande appartient à la garde frontière nationale (*rajavartiolaitos* – *border guard*), elle-même subordonnée au Ministère de l'Intérieur. La frontière des eaux territoriales s'étend sur plus de 1 250 km, deux districts partageant le domaine maritime finlandais : le district du Golfe de Finlande et celui de l'Ouest finlandais (de Tornio aux îles Åland) qui concerne davantage notre espace d'étude. Les activités de recherche et de sauvetage ayant lieu dans le domaine maritime du district Ouest sont menées sous la responsabilité de deux centres : le MRCC (*Maritime Rescue Coordination Centre*) de Turku et le MRSC de Vaasa. Le district Ouest est divisé en quatre domaines de garde côtière : Oulu, Vaasa, Turku et Åland. Le domaine maritime de la garde côtière d'Oulu regroupe les stations de Kemi, Virpiniemi et Kalajoki (carte 36).

Les données qualitatives dont nous faisons état, proviennent principalement d'entretiens faits lors de nombreuses visites à la station des garde-côtes de Virpiniemi pendant les hivers 2006 à 2008.

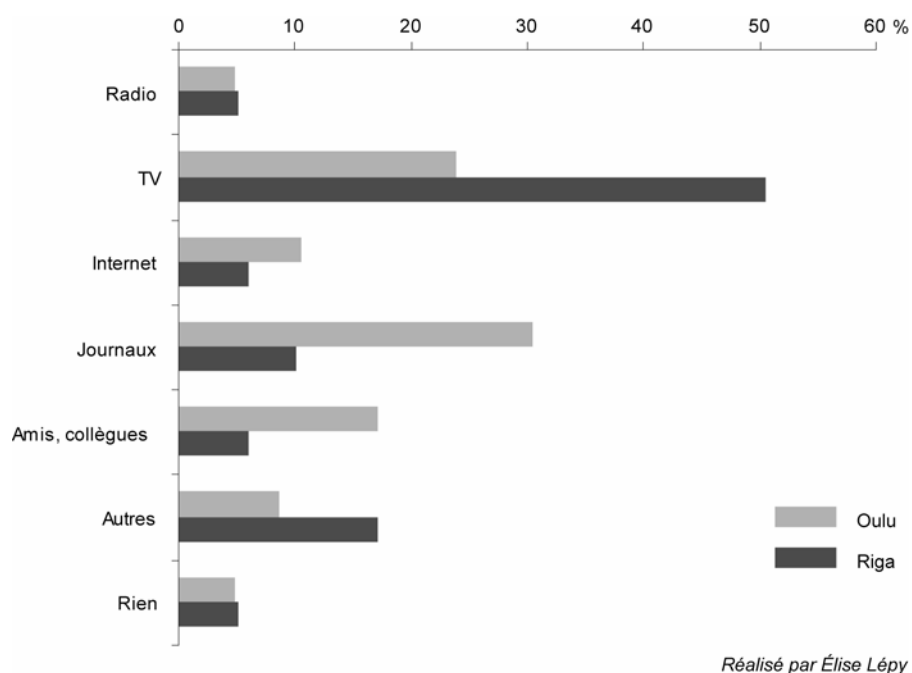
9.4.1 - La prévention du risque

Afin de prévenir des risques potentiels sur la banquise, les autorités locales doivent, en premier lieu, se tenir informées des conditions glacielles. Des observations générales proviennent du Service des glaces de Finlande qui diffusent quotidiennement les cartes des conditions glacielles en Mer Baltique. D'autre part, les garde-côtes s'informent par leurs moyens propres en se déplaçant directement sur les endroits à risque potentiel et en établissant les constats. Selon la période de l'année, les patrouilles

utilisent un aéroglisseur pouvant être conduit autant sur la glace que sur l'eau, des motoneiges ou même une voiture.

Les autorités locales ont ensuite pour mission d'informer et de communiquer à la population locale des indications sur les risques et les dangers probables. L'augmentation de la fréquentation de la banquise de ces dernières années, a eu pour conséquence un développement des campagnes d'information sur les risques en mer gelée dans le cadre de différentes expositions ou encore auprès des scolaires. En effet, l'éducation et l'adhésion de la population face à la question des risques sur la banquise semble indispensable à leur meilleure gestion.

D'après notre enquête sur « la fréquentation de la banquise », plus de 30% des personnes interrogées à Oulu se tiennent informées par les journaux locaux, plus de 23% par la télévision et plus de 17% par des amis ou des collègues dont la profession est en relation avec le milieu maritime (graphique 38). À Riga la moitié de la population interrogée est informée par la télévision.



Graphique 38 – Moyens d'information sur les risques sur la banquise
 Graph 38 – Information tools about risks on sea ice

La prévention des risques en mer gelée ne réside pas seulement en l'information des seules conditions glacielles et météorologiques mais également sur les règles comportementales à respecter sur la banquise.

Contrairement à la Suède, la Finlande a instauré des règles pour la conduite sur les routes de glace. Dans le cas des motoneiges, le véhicule doit être enregistré et seuls les individus de plus de 15 ans ont le droit de le conduire. Le port du casque est obligatoire et la vitesse est limitée à 80 km/h. Les régulations sont sous la responsabilité de l'autorité

régionale d'Oulu et des autorités environnementales. Tout comme pour les voitures, des panneaux de signalisation sont installés et officiellement gérés par le Ministère des Transports.

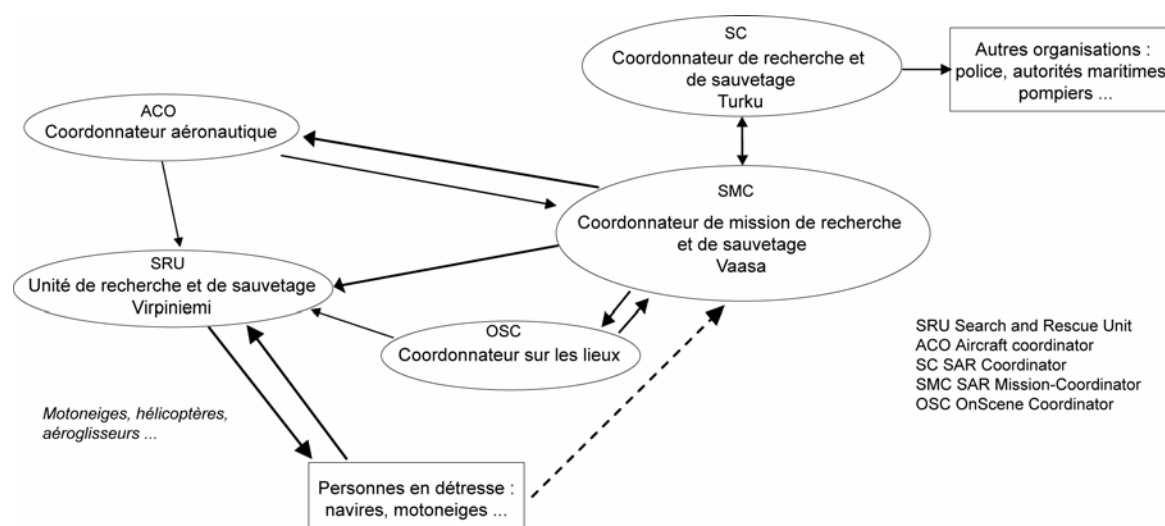
Les autorités locales tentent également de transmettre des recommandations à suivre avant de s'aventurer sur la banquise. Avertir et informer des proches d'un périple et de son itinéraire, consulter le bulletin météorologique, vérifier le bon fonctionnement du moyen de transport utilisé ainsi que des navigateurs, s'équiper de matériel de secours. Les vestes de sécurité, fusées de détresse, possibilité de faire du feu, équipement radio (se réduisant souvent à un simple téléphone portable) sont largement conseillés en cas d'excursion sur la banquise. Une carte marine et un GPS sont aussi recommandés pour les expéditions éloignées du rivage. Dans le cas d'un incident ou d'un accident, il est préférable de rester sur place et d'attendre les secours.

Ces recommandations n'évitent pas certains incidents et accidents mais en diminuent fortement le nombre. Les garde-côtes sont alors en charge de porter assistance aux personnes en difficulté.

9.4.2 - L'intervention et la gestion en cas d'incident ou d'accident

Le déroulement des opérations de recherche et de sauvetage ne repose pas seulement sur une simple intervention de la garde côtière locale. L'organisation en est bien plus complexe puisqu'elle fait intervenir les divers centres de recherche et de sauvetage du domaine maritime finlandais. Dans le cadre d'un accident en Baie de Botnie, les stations des garde-côtes de Virpiniemi, de Kemi et de Kalajoki travaillent en collaboration avec le MRSC de Vaasa (figure 19) qui coordonne l'intégralité de la mission de recherche et de sauvetage. Il met donc en relation les diverses unités nécessaires sur le terrain : l'unité aéronautique, l'unité locale de recherche et de sauvetage (l'une des trois stations) avec le coordonnateur des lieux. Selon le type d'accident, le MRCC de Turku sollicite d'autres organisations telle la police, certaines autorités maritimes ou des pompiers pour une intervention sur les lieux de l'accident. Il peut également arriver que les garde-côtes du domaine maritime d'Oulu travaillent en collaboration avec la garde côtière suédoise sur les eaux de la Baie de Botnie.

Les garde-côtes peuvent avoir recours à divers équipements de sauvetage tels des hélicoptères basés à Rovaniemi, Turku et Helsinki ; un aéroglisseur (photographie 36); des motoneiges et divers bateaux de sauvetage. La coopération des volontaires dans les opérations de recherche est essentielle pour les garde-côtes. Des associations de volontaires sont ainsi organisées, officiellement connues par les autorités locales.



Élise Lépy
d'après les données collectées auprès de Virpiniemi Coast Guard

Figure 19 – Organisation des opérations de recherche et de sauvetage
Figure 19 – Search and rescue organisation



Photographie 36 – Aéroglisseur de la station côtière de Virpiniemi portant secours à une motoneige bloquée dans la glace – Mars 2008

Picture 36 – Aircraft from Virpiniemi coast guard station rescuing a snowmobile stuck in the ice – March 2008
(Source : Finnish Border Guard)

9.4.2.1 - L'appel au secours

D'après les données collectées auprès des garde-côtes de Virpiniemi, il semble que le moyen le plus efficace pour avertir d'un accident soit d'utiliser d'abord les « anciennes méthodes » tels l'envoi de fusées de détresse rouges ou faire un feu. Non seulement ces moyens permettent d'être vu et localisé, mais ils peuvent surtout éviter des situations parfois dramatiques comme le passage d'un cargo près d'un groupe de personnes sur la banquise (Lépy, 2008, 262). Les données collectées sur les accidents en mer ont permis de dénombrer les moyens utilisés pour appeler les secours par les personnes en difficulté. Les données concernent les hivers (du 1^{er} novembre au 30 avril) de la période 1990-2005 (figure 20).

	1990	1995	2000	2005	Pourcentage 1990 – 2005
Téléphone					67,3
Radio VHF					5,7
NMT					3,8
GSM					17,6
Fax					1,9
Satellite					1,3
Observation					2,5

Élise Lépy
d'après les données collectées auprès de Virpiniemi Coast Guard

Figure 20 – Moyens utilisés pour se signaler par les personnes impliquées dans un accident sur la banquise dans le domaine maritime de la garde côtière d'Oulu, du 1^{er} novembre au 30 avril de 1990 à 2005

Figure 20 – Technologies used by persons involved in an accident on sea ice in the maritime area of Oulu Coast Guard, from November 1st to April 30th from 1990 to 2005

D'après ces données, il y a suprématie du téléphone (plus de 67% sur la période 2000-2005) comme moyen le plus utilisé pour l'appel au secours. La radio VHF (*Very High Frequency*) est davantage utilisée par les marins qui appellent sur les canaux 16 et 70, la bande marine VHF et les canaux de détresse internationaux. Au début des années 1990, le NMT (*Nordic Mobile Telephone*), premier système de téléphone cellulaire complètement automatique en Fennoscandinavie, a été utilisé pendant une décennie. À la fin des années 1990, le GSM (*Global System for Mobile*), le plus standard des téléphones mobiles, est arrivé sur le marché et a commencé à être utilisé principalement par les conducteurs de motoneiges (plus de 17% sur la même période). L'avantage de cette technologie a résidé en la possible localisation du téléphone mobile en estimant sa distance à l'antenne la plus proche. Ces dernières années les technologies satellitaires ont aussi commencé à intéresser les marins. Cospas-Sarsat est ainsi un système satellitaire international développé pour les opérations de recherche et de secours qui fournit des alertes fiables et précises et des données de localisation géographique relayées par les radiophares de détresse

transmettant des signaux aux satellites. Les stations au sol reçoivent les signaux détectés et envoient les informations aux centres de recherche et de secours.

Ces derniers hivers, une baisse des interventions de secours a été observée par les garde-côtes de Virpiniemi. L'utilisation croissante du téléphone mobile depuis le début des années 2000 en serait l'une des principales raisons puisqu'il permet de joindre facilement des proches pour recevoir une aide non-officielle.

9.4.2.2 - La recherche et le sauvetage

Comme on l'a déjà dit, les opérations de recherche et de sauvetage dans le domaine maritime d'Oulu sont menées en étroite coopération entre le MRCC de Turku, le sous-centre de Vaasa et les stations de garde-côte de Virpiniemi, Kalajoki et Kemi. Les différents centres utilisent un système de radiocommunication appuyé sur trois technologies pour communiquer entre eux.

Les radios VHF et MF (*Medium Frequency*) sont principalement utilisées par les autorités maritimes. Dans l'assistance au navire, le système international AIS (*Automatic Identification System*) permet aux autorités d'identifier et de localiser des navires en détresse et d'échanger des messages *via* la VHF. Récemment, le gouvernement finlandais a mis en place un réseau de télécommunication pour les autorités finlandaises, le Virve (*Viranomaisverkko*). Cette technologie développée par Nokia permet aux garde-côtes d'entrer en contact avec n'importe quelle autorité comme la brigade de pompiers, la police... et dans beaucoup d'opérations de secours, elle est désormais utilisée. Selon l'opération à mener, la technologie par satellite peut être préférée désormais par les garde-côtes. Inmarsat (*International maritime satellite organization*) fournit des services de détresse et de sûreté à la communauté maritime.

En Lettonie, les opérations de secours et de sauvetage s'organisent autour du MRCC de Riga et des sous-centres de Kolka, de Jurmalciems, Ventspils et de Pabilosta. Leurs interventions ont l'objectif de combattre la pollution de la mer engendrée par les navires. On peut regretter ici que le MRCC de Riga ne nous ait fourni aucun renseignement détaillé sur ces opérations de recherche et de sauvetage nous permettant d'étayer notre approche comparative entre les espaces étudiés.

9.5 - CONCLUSION

La banquise est un espace à la fois attractif et répulsif selon la perception que l'on s'en fait. De nombreux aléas naturels d'origine météorologique et glacielle se produisent tous les hivers et ont des conséquences immédiates sur la fréquentation de la banquise et ses problèmes éventuels. De manière générale, les personnes impliquées dans un incident ou accident sont moins souvent celles qui pratiquent des activités d'une durée courte et peu éloignée du rivage (comme par exemple le patinage sur glace) que celles qui partent pour des périples d'une journée voire plus, dans le cadre de leur profession ou non, et qui s'exposent alors à de véritables dangers. Il est évident que la prise en compte des recommandations fournies par les autorités locales a réduit considérablement le risque en mer gelée. Cependant, malgré les nombreuses campagnes de prévention sur les risques en Baie de Botnie, une dizaine de cas plus ou moins graves est recensée tous les hivers impliquant de nombreuses personnes. Les glaces de mer peuvent donc, en fonction des aléas et de l'exposition des individus au danger, représenter un risque pour les sociétés. Le travail des autorités locales et notamment celui des garde-côtes est donc essentiel pour la prévention des risques et la gestion des incidents et accidents.

Par ailleurs, l'organisation de cet espace maritime « continentalisé » saisonnièrement repose sur l'appropriation par ses usagers de la banquise qui s'effectue en fonction du respect de règles contrôlant les activités pratiquées. Ainsi, la banquise est entrecoupée de chenaux de navigation entretenus par les brise-glaces, de véritables routes sur glace sont ouvertes aux automobiles et motoneiges avec une signalisation adéquate et bien d'autres activités y sont aussi pratiquées (figure 21).

La gestion du risque traduit bien entendu l'évolution territoriale saisonnière de cet espace. La prise en compte du risque dans les politiques de prévention contribue à modifier l'organisation spatiale saisonnière des eaux maritimes de la Baie de Botnie.

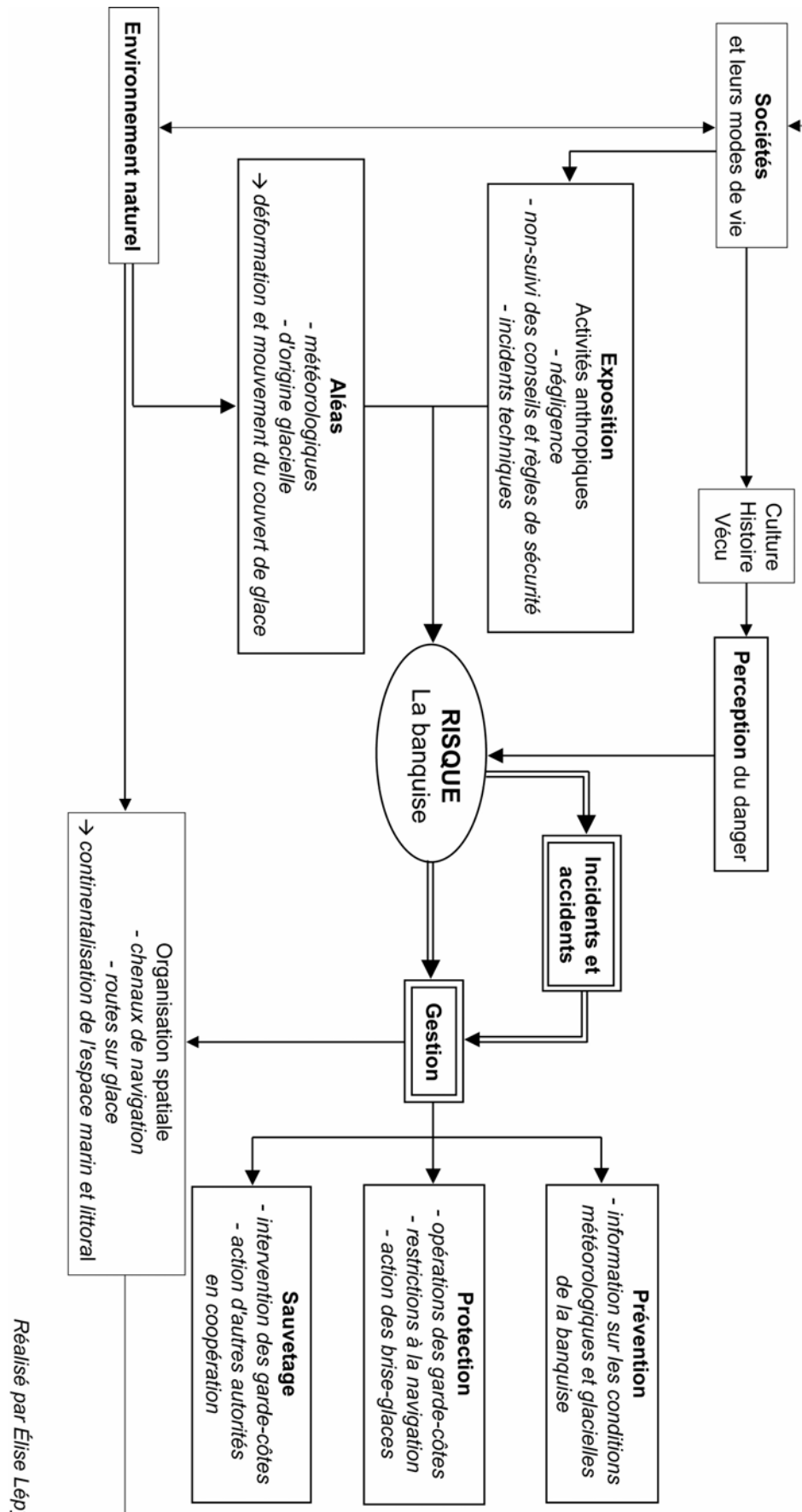


Figure 21 - De l'aléa à la gestion du risque en mer gelée
Figure 21 - From hazard to risk management on sea ice

Partie 4

Tendances et perspectives

Chapitre 10

Passé et avenir des glaces de la Mer Baltique

- 10.1 – Historicité des conditions glacielles
- 10.2 – L'analyse régionale fine : le cas de la Baie de Botnie et du fond du Golfe de Riga
- 10.3 – Le futur des conditions glacielles de la Mer Baltique
- 10.4 – Conclusion

Chapitre 11

Les impacts socio-économiques des variations glacielles

- 11.1 – Les transformations probables des activités traditionnelles
- 11.2 – L'évolution de la navigation maritime
- 11.3 – Vers un nouvel espace économique ?
- 11.4 – Conclusion

Il est désormais dans beaucoup d'esprits la question de plus en plus prégnante des variations de la surface de la banquise comme témoins des changements climatiques. Effectivement, les scénarios les plus alarmistes prévoient une réduction nette de la banquise de la Baltique voire une disparition totale dans les années futures. Toutes les interrogations qui se posent sur le raccourcissement de la saison glacielle, la diminution de l'épaisseur de glace, et la réduction de la banquise sont, bien entendu, légitimes pour le public dans un contexte scientifique actuel de type catastrophiste qui ne cesse médiatiquement d'alarmer les populations.

Toutefois, pour prendre du recul par rapport à ces positions, il nous paraît opportun d'observer, au travers l'analyse de l'historicité des conditions glacielles, leurs variations au cours des siècles passés et de voir si de grandes tendances s'en dégagent réellement. De plus, une telle étude peut permettre sinon de répondre, du moins d'avancer sur la question qui oppose soit l'hypothèse d'une variabilité cyclique naturelle bien connue par les climatologues dans leurs études des séries de données météorologiques, soit l'hypothèse d'une tendance linéaire plus ou moins continue qui mènerait à un réchauffement climatique d'ampleur global.

D'autre part, même si la disparition des glaces de mer peut ne pas avoir d'effet considérable sur le niveau mondial des eaux marines (André, 2005, 11 ; Lageat, 2006, 85), une réduction de la banquise pourrait engendrer, en revanche, des conséquences environnementales, économiques et géopolitiques considérables à l'échelle de l'espace de la Mer Baltique. Il convient dès lors de définir les impacts des variations glacielles passées pour tenter de déterminer les conséquences socio-économiques futures d'une éventuelle augmentation des températures sur l'évolution de la banquise baltique.

Passé et avenir des glaces de mer de la Baltique

La formation, la croissance et la fonte des glaces de mer sont très dépendantes des facteurs climatiques comme nous avons pu le montrer antérieurement. Or le climat de la Terre est caractérisé par une variabilité naturelle liée aux changements des radiations solaires, à la configuration des continents et des océans, aux changements de la composition de l'atmosphère... (Berger, 1992 ; Jóhannesson et *al.*, 1995, 183 ; Tabeaud, 2008). Très sensibles aux variations de la température de l'air en hiver, les glaces de mer de la Baltique constitueraient pour certains un bon indicateur du changement climatique (Tinz, 1996, 320).

Certes, l'extension de la banquise, son épaisseur et la durée de la saison glacielle y montrent une large variabilité interannuelle. Le graphique 1 sur l'extension des glaces de mer depuis 1720 témoigne ainsi de ses nombreuses variations passées qui vont être étudiées ci-dessous.

Mais dans ce chapitre, il est aussi question du futur des glaces de mer de la Baltique. Tend-on ici vers un réchauffement climatique qui induirait alors une réduction considérable de la banquise ? L'évolution des conditions glacielles est-elle linéaire ou bien cyclique ? Pour répondre à toutes ces interrogations, il semble donc opportun d'étudier d'abord le passé, soit l'historicité des glaces de mer de la Baltique, à deux échelles de temps : tout d'abord sur plusieurs siècles puis, à plus court terme, au XX^{ème} siècle. Par ailleurs, les variations climatiques affectent-elles de la même manière régionalement toutes les parties de la Mer Baltique ? Une analyse approfondie de nos espaces d'étude, la Baie de Botnie et le Golfe de Riga, semble bien entendu nécessaire pour avancer fructueusement dans ces débats avant de se tourner vers l'analyse critique des différents scénarios actuellement émis par les scientifiques.

10.1 - HISTORICITE DES CONDITIONS GLACIELLES

Il a fallu attendre le XIX^{ème} siècle pour que les premières observations régulières des conditions des glaces de mer de la Baltique commencent vraiment dans le but premier de répondre aux besoins de la navigation hivernale. L'absence de système d'observation du temps, et de mesures des caractéristiques glacielles de la banquise, rendent, il est vrai,

difficile la construction de très longues séries de données sur les dates d'embâcle et de débâcle, sur l'épaisseur de la banquise et sur son étendue maximale. Alors que la dendrochronologie, l'analyse des pollens et autres approches scientifiques peuvent fournir une information indirecte sur les fluctuations annuelles et sur les tendances à long terme des glaces de mer (Bell et Ogilvie, 1978, 331), les sources littéraires telles que les chroniques historiques et les carnets de voyages documentent aussi souvent sur les conditions extrêmes de la banquise, mais de façon ponctuelle.

Au XIX^{ème} siècle, les journaux finlandais (*Oulun Wiikko-Sanomia*, *Ilmarinen*, *Suometar...*) commencent à rapporter régulièrement l'état des conditions météorologiques et glacielles. Les observations régulières ont dès lors permis à certains scientifiques de construire de longues séries chronologiques sur l'extension maximale du couvert de glace. R. Jurva (1937) fut le premier à reconstituer l'évolution à partir de 1720 jusqu'au début du XX^{ème} siècle (graphique 1) et son travail fut poursuivi par E. Palosuo (1953) et Ari Seinä et E. Palosuo (1996). Parallèlement, de nombreux scientifiques ont publié des recherches sur des thématiques similaires : entre autres, G. Kolowski et R. Glaser (1995, 1999) ont présenté un indice glaciaire qui caractérise la sévérité des conditions glacielles depuis 1701 dans la Baltique de l'Ouest et quelques années plus tard, ils ont prolongé leur étude en remontant à 1501 ; Svetlana Jevrejeva (2001) a aussi proposé une analyse sur la reconstruction de la sévérité des hivers depuis le XVI^{ème} siècle dans le Nord de la mer Baltique.

10.1.1 – Les glaces de mer, au cœur de nombreux récits de voyageurs

La lecture et l'analyse d'anciens manuscrits contenant les aventures de voyageurs visitant ces contrées nordiques alors méconnues, sont souvent riches en information. Descriptives et ponctuelles puisque les voyages ne duraient que quelques mois, ces narrations ne résultent évidemment que d'observations émanant d'un seul point de vue, celui de l'auteur lui-même. Si leur fiabilité est difficile à évaluer, elles restent toutefois un bon témoignage de l'état des glaces et livrent de nombreux éléments sur les us et coutumes des habitants riverains de la Baltique.

L'un des plus anciens et des plus populaires manuscrits est celui d'O. Magnus qui rédigea et publia à Rome en 1555, l'"*Histoire des peuples du Nord*". Elle eut une grande notoriété aux XVI^{ème} et XVII^{ème} siècles et a contribué à faire connaître les contrées et populations nordiques d'Europe que l'auteur a lui-même découvert lors d'un voyage en 1518-1519. Les informations de cette œuvre (publiée en français en 2004) sont ainsi complémentaires de celles figurant sur sa *Carta Marina* (figure 3, 1539). Sur cette dernière, O. Magnus fait figurer les glaces de mer dans les golfes de Botnie, de Finlande et de Riga, et le long des côtes polonaises et allemandes. Les représentations illustrent aussi

différentes situations de la vie des habitants à la fin du Moyen-Âge. Il y apparaît également des routes de glace dans l'Est du Golfe de Finlande et dans le Nord du Golfe de Botnie qui permettaient aux voyageurs d'atteindre le rivage opposé.

Ainsi, de nombreuses activités existaient sur la banquise qui devenait parfois un lieu d'affrontements. Mais à côté de ces batailles apparemment nombreuses en Mer Baltique, la banquise servait également de plateforme pour les activités récréatives. Ainsi étaient organisées vers la fin du mois de décembre des courses de chevaux sur glace lorsque la neige et le gel le permettaient sur les lacs et eaux marines. Ces compétitions offraient les chevaux les plus rapides aux dieux, et divertissaient la population (*ibid.*, Livre 1 : 24, p.29-30). Il n'était pas rare aussi d'organiser des foires et des marchés sur la glace et d'y trouver des auberges construites pour la saison hivernale. Elles étaient destinées aux voyageurs et servaient d'abri aux hommes comme à leurs animaux de trait. Elles étaient souvent construites le long du rivage voire à même la banquise que les voyageurs préféraient emprunter plutôt que les routes de forêts trop encombrées par la neige. La présence de ces auberges sur la banquise témoigne indirectement de l'extension des glaces de mer. Ainsi, pendant certains hivers extrêmement froids, la mer fut totalement prise en glace et il était possible de la traverser à pied de Lübeck au Danemark et en Prusse (en 1323), de Dantzic à Lübeck (en 1423) en empruntant la route qui d'ordinaire était seulement praticable pour les navires, et, du Jutland à Oslo (en 1294) (*ibid.*, Livre 1 : 26, pp. 35-37). Enfin, il n'échappera pas au lecteur attentif la représentation de la chasse aux phoques dans le Nord du Golfe de Botnie, d'ailleurs décrite ici comme « pêche au veau de mer » et qui était largement répandue à cette époque.

Toutefois, malgré la diffusion importante de l'œuvre d'O. Magnus en Europe, ces contrées nordiques sont restées jusqu'au XVII^{ème} siècle, une destination peu prisée par les voyageurs des pays d'Europe occidentale et méridionale. Ce n'est qu'en 1681 que Jean-François Regnard fut le premier français à s'y aventurer se rendant jusqu'en Laponie au-delà de Tornio.

En 1736 et 1737, Pierre Louis Moreau de Maupertuis organisa aussi une expédition scientifique chargée de vérifier l'hypothèse de l'aplatissement des pôles. Les membres de l'expédition s'installèrent à Tornio pendant l'hiver 1736-1737 et effectuèrent des mesures méridiennes en Laponie. Quelques années plus tard, en 1744, l'abbé Réginald Outhier, cartographe de l'expédition, relata le voyage dans son ouvrage intitulé "*Journal d'un voyage au Nord en 1736 et 1737*". Outre l'expérience scientifique ainsi menée, les voyageurs vécurent aussi la totalité de l'hiver juste en-deçà du cercle polaire. Il ressort du récit de R. Outhier que l'hiver 1736 / 1737 a été un hiver avant tout neigeux puis froid. Les températures mesurées lors de leur séjour en Laponie (tableau 27) sont ainsi descendues jusqu'à -29 degrés Réaumur soit -36 degrés Celsius au début de janvier. Puis s'est installée une période de douceur avec quelques degrés en-dessous de zéro à la fin de ce premier mois de l'année 1737 et au début du mois de février. L'hiver s'est par la suite

largement prolongé avec de basses températures (-25°C à la fin du mois d'avril) et des chutes de neige jusqu'au 19 mai.

Dans son ouvrage, l'auteur évoque, bien entendu, les glaces marines du Golfe de Botnie et fluviales de la Tornionjoki. Ainsi, on apprend que le 17 novembre « *les vaisseaux qu'on attendait de Stockholm étaient arrivés assez près des côtes, le samedi 17 du mois ; mais les glaces les avaient empêchés d'approcher des terres et n'avaient pas été assez fortes pour pouvoir transporter en traîneau les marchandises qu'ils apportaient* ». Dans les paragraphes précédents, l'auteur indique que le fleuve commença à geler le 1^{er} novembre. On peut donc en conclure que les premières glaces de mer se sont formées cette année-là quelques jours après la moyenne du 6 novembre calculée sur la période 1937-2005 à Kemi (graphique 50). D'autre part, il décrit précisément les phénomènes d'alternance gel / dégel avant la mise en place de la banquise permanente, et les difficultés que ses compagnons et lui-même ont rencontrées pour se déplacer. La débâcle, quant à elle, a eu lieu probablement au début du mois de juin puisque l'auteur signale que le 25 mai, « *il n'y avait presque plus de glace sur le fleuve. On voyait cependant encore la Mer toute blanche de glaces couvertes de neige* ». D'autre part, le 9 juin une partie de l'expédition embarqua sur un vaisseau et vit des glaces flottantes lors du trajet vers Stockholm. Comme la moyenne de disparitions des glaces pour la période 1937-2005 est évaluée au 17 mai à Kemi, la débâcle signalée par R. Outhier fut donc tardive, comparativement à la moyenne du XX^{ème} siècle. L'auteur mentionne également que le 14 mai, P. Maupertuis prit un morceau de glace du fleuve, il « *avait deux pieds d'épaisseur (soit 64 centimètres). On nous dit que communément elle était beaucoup plus épaisse, mais que les neiges qui étaient tombées cette année, d'abord après les premières gelées, avaient empêché la glace de devenir aussi épaisse qu'à l'ordinaire* ». Donc, d'une part, on nous précise que l'épaisseur de glace était moindre que la normale ; d'autre part, l'épaisseur de glace du fleuve Torniojoki à la mi-mai 1737 correspond à peu près à celle de la glace du lac Kilpisjärvi situé en amont à la même période des hivers modérés 2001 et 2004 (on sait que les glaces lacustres fondent plus tardivement). Cela suggérerait donc une diminution de l'épaisseur de glace entre ces observations du XVIII^{ème} et nos connaissances du XX^{ème} siècle.

Date	Degrés Réaumur	Degrés Celsius	Date	Degrés Réaumur	Degrés Celsius
7 Novembre	-20	-25	13 Janvier	-23	-28,7
3 Décembre	-18	-22,5	14 Janvier	-13	-16,2
19 Décembre	-14	-17,5	19 Janvier	-19	-23,7
21 Décembre	-18	-22,5	21 Janvier	-16	-20
26 Décembre	-15	-18,7	23 Janvier	-20	-25
27 Décembre	-25	-31,2	Période de douceur, quelques degrés < 0		
1 ^{er} Janvier	-22	-27,5	6 Février	-20	-25
2 Janvier	-25,2	-31,5	25 Février	-20	-25
4 Janvier	-25	-31,2	3 Avril	-5	-6,2
6 Janvier	-29	-36,2	5 Avril	-9	-11,2
9 Janvier	-17	-21,2	6 Avril	-17	-21,2
12 Janvier	-4	-5	7 Avril	-20	-25

Source : les données sont extraites du texte de R. Outhier, 1744

Tableau 27 – Températures mesurées (en degrés Réaumur transcrites en degrés Celsius) à Tornio par les membres de l'expédition scientifique de Maupertuis l'hiver 1736/1737
 Table 27 – Measured temperatures (in Réaumur degrees transcribed in Celsius degrees) at Tornio by the members of the Maupertuis scientific expedition during the winter 1736 / 1737

Quelques décennies plus tard, l'Anglais William Coxe accomplit un voyage en Europe du Nord en 1778 et 1779. Il rapporte son voyage dans ses "*Travels into Poland, Russia, Sweden and Danemark*" (1784) traduits et publiés en français en 1786. Dans leur périple d'une année, W. Coxe et ses compagnons furent amenés à joindre Saint-Petersbourg à Stockholm en hiver. Une partie du récit relate donc les difficultés survenues lors de leurs déplacements et le choix fait de traverser l'entrée du Golfe de Botnie de Turku (à l'époque Åbo en suédois et capitale de la Finlande suédoise) à Stockholm. Après avoir longé les côtes du Golfe de Finlande, les voyageurs pensaient faire le tour du Golfe de Botnie et se réjouissaient de se rendre en Laponie où P. Maupertuis fit ses mesures. Mais un dégel général ne leur permit pas de continuer leur voyage en traîneau et on leur conseilla donc d'emprunter la voie maritime puisque :

Il ajouta
que le passage au travers du golfe de Bothnie étoit heureusement prati-
cable dans ce moment, les canaux entre les petites isles étant assez
gelés pour porter des traîneaux, & l'autre partie du golfe n'étant pas
embarrassée de glaces flottantes.

Extrait de *Voyages en Pologne, Russie, Suède et Danemark*, p.87

La traversée dura une semaine du mois de février 1779. L'auteur décrit avec de nombreux détails l'état du couvert de glace de la Mer d'Archipel qu'ils traversèrent pour rejoindre l'île d'Åland :

Dans quelques endroits la glace se brisoit en petits feuillets; mais dans le plus grand nombre elle étoit raboteuse & formoit des maffes comme des vagues gelées. La grande mer de glaces étoit souvent coupée par des lignes de glaçons rompus & escarpés, & la route qui n'étoit marquée que par des branches d'arbres, & bordée que de rochers qui sembloient s'élancer des deux cotés, présentoit un des spectacles les plus affreux qu'on puisse imaginer.

Extrait de *Voyages en Pologne, Russie, Suède et Danemark*, p.89

Il semble que la banquise présentait de nombreux « trous » qu'il fallut contourner. Selon les études de R. Jurva, l'hiver 1779 fut modéré et a vu la banquise de la Baltique s'étendre sur quelques 110 000 km². De ce fait l'autre partie de la traversée n'était pas prise en glace et les voyageurs ont dû naviguer en bateau d'Åland à la côte suédoise. Les conditions météorologiques mentionnées par l'auteur semblent également confirmer la douceur de l'hiver. Les tempêtes, les températures plutôt douces pour un mois de février – cinq degrés au-dessus du point de congélation – et la précocité de la fonte des neiges, témoignent de la douceur de l'hiver 1779.

Pendant notre séjour à Stockholm, à la réserve d'un seul jour de neige, nous eûmes un aussi beau temps que j'en aie jamais vu en Angleterre pendant le printemps. C'est un phénomène bien rare dans le temps & sous le climat où nous étions, c'est-à-dire, à la fin de Février, & au 59^e. degré 20 minutes de latitude. Souvent les neiges n'y fondent qu'au mois d'Avril.

Extrait de *Voyages en Pologne, Russie, Suède et Danemark*, p.105

Deux décennies plus tard, l'explorateur italien, Giuseppe Acerbi, entreprit à son tour un grand voyage dans le Nord de l'Europe. Son objectif est d'atteindre le Cap Nord en traversant la Suède, la Finlande et la Laponie. Il publie ses récits dans "*Travels through Sweden, Finland and Lappland to North Cape, in the years 1798-1799*", ensuite traduits en allemand et en français et publiés en 1804. Il relate ainsi ses diverses aventures vécues avec son compagnon de voyage Bernardo Bellotti. Contrairement à beaucoup d'autres voyageurs s'étant rendus dans ces contrées nordiques à la belle saison, G. Acerbi effectua une partie de son voyage dans les paysages enneigés et gelés du Nord de la Baltique. Le récit de G. Acerbi est très riche en renseignement sur l'hiver, l'état de la banquise et les habitudes des habitants.

Bien que les recherches de R. Jurva qualifient l'hiver 1798 comme modéré avec seulement 142 000 km² de glace en Mer Baltique, les propos de G. Acerbi donnent l'impression d'un hiver rude et froid. En effet, l'auteur décrit la difficulté de se rendre en traîneau de Vaasa à Oulu, trajet où ils voyagèrent la plupart du temps sur la glace (figure 22), le long de la côte et en traversant les rivières. G. Acerbi note bien des conditions

hivernales sévères qui se traduisent par l'observation de situations étonnantes telles l'encerclement de bateaux pris par la glace de mer :

Avant d'ar-
river à Gamla-Carleby⁴⁴, nous vîmes à l'ancre
deux frégates, et bientôt après nous passâmes
au milieu de quatre ou cinq vaisseaux mar-
chands, que la glace avait arrêtés et contraints
à passer l'hiver dans ces froides régions.

44

Extrait de *Voyage au Cap Nord par la Suède, la Finlande et la Laponie*, p. 3

Les difficultés rencontrées par la navigation ne sont pas les seuls témoins de ce froid qualifié par G. Acerbi d'« excessif ». D'ailleurs, l'explorateur éclaire sur l'origine de ce froid « dû aux vastes forêts et aux déserts » et indique que des amas de glace peuvent être présents l'été, ce qui, de nos jours, n'apparaît pas dans la région d'Oulu. Son récit fournit également des informations importantes sur les températures. Il compare les données thermiques entre Stockholm et Oulu (Uléaborg) :

D'après une comparaison des observations
faites à Stockholm et à Uléaborg, il paraît que
la chaleur du thermomètre de Celsius, au-
moins à la hauteur de Stockholm, pendant
toute l'année ; est de six degrés environ au-
dessus de zéro, pendant qu'à Uléaborg il est
généralement à un degré deux dixièmes au-
dessous de la glace ; conséquemment le cli-
mat d'Uléaborg diffère de sept degrés deux
dixièmes. Pendant vingt ans, le mercure à
Stockholm tomba sept cent neuf fois au quin-
zième degré, et une fois jusqu'à quarante au-
dessous de la glace. Il y a à Uléaborg deux mois
d'hiver de plus qu'à Stockholm, et un tiers de
printemps de moins.

45

Extrait de *Voyage au Cap Nord par la Suède, la Finlande et la Laponie*, p. 25

L'auteur mentionne donc que la température moyenne annuelle à Oulu est de -1,2°C. Cette valeur négative, nettement en-deçà des moyennes actuelles, confirmerait bien l'appartenance de cette période à la fin du Petit Âge Glaciaire observé partout en Europe. Dans les pages postérieures, G. Acerbi inclut un tableau de données thermiques pour la période 1776 - 1799 à Oulu (tableau 28). En s'attardant davantage sur les moyennes annuelles de 1776 à 1794, il est possible de conclure que ces années ont été plus froides (0,17°C en moyenne) - de près de 2°C - que celles de 1976 à 1994 (2,04°C) soit deux siècles

⁴⁴ Gamla-Carleby est le nom suédois de Kokkola

⁴⁵ Uléaborg est le nom suédois d'Oulu

plus tard. Il faut toutefois s'interroger sur la fiabilité des données, sur le matériel et les techniques de mesure qui ont évolué.

Années	Plus grande chaleur	Plus grand froid	Moyenne chaleurs	Moyenne froids	Température moyenne
1776	21	-29	7	-12	-0,9
1777	22	-27	7	-12	-2,2
1778	22	-22	6	-13	-0,5
1779	21	-27	7	-12	-3,9
1780	20	-29	6	-15	-3,4
1781	20	-40	6	-15	-0
1782	23	-37	9	-10	-2,1
1783	20	-31	7	-15	-1,5
1784	17	-30	6	-12	-1,9
1785	25	-30	9	-11	0,5
1786	27	-32	11	-11	1
1787	25	-31	21	-10	1,9
1788	29	-34	12	-20	0,9
1789	30	-34	16	-20	1,8
1790	26	-28	11	-16	2,7
1791	24	-21	11	-14	3,1
1792	28	-33	13	-19	1,7
1793	27	-32	13	-16	2,1
1794	28	-24	13	-16	4
1795	28	-34			
1796	30	-31			
1797	27	-21			
1798	31	-31			
1799		-40			
Moyenne	24,8	-30,6	10	-0,9	0,2

Extrait d'un journal météorologique tenu à Oulu sous le 65° 1' 30" latitude Nord, par J. Julin,
Voyage au Cap Nord par la Suède, la Finlande et la Laponie, p.29

Tableau 28 – Températures (en °C) à Oulu de 1776 à 1799
 Table 28 – Temperatures (in °C) at Oulu from 1776 to 1799

À côté de ces observations météoglacielles, G. Acerbi s'est beaucoup intéressé aux us et coutumes hivernaux des habitants. Alors que la plupart des gens de l'époque, qui n'ont jamais visité l'Europe du Nord, les pensent inactifs et miséreux, il montre que, bien au contraire, ils s'adaptent à la saison. Il est tout particulièrement intrigué par les méthodes de pêche sur glace et de chasse. Il est remarque bien que le matériel ait évolué depuis plus de deux siècles, que les techniques de pêche blanche avec filet sous glace et celles de la chasse aux phoques soient restées jusqu'à nos jours toujours à peu près les mêmes. L'auteur narre également quelques anecdotes évocatrices d'accidents et de risques encourus par les habitants sur la glace...



Figure 22 – Illustration d'un périple sur la glace au XVIII^{ème} siècle
 Figure 22 – Picture of a journey on ice during the 18th century

Edward Clarke entreprend également son voyage dans les contrées baltiques quelques mois après celui de G. Acerbi. Il part d'Angleterre au printemps 1799 pour rejoindre Hambourg, visite au printemps et en été la côte orientale suédoise et s'aventure même jusqu'à Muonio. Puis il se dirige vers Oulu et continue son périple jusqu'à Vaasa où il embarque pour rejoindre Umeå. Il prolonge la côte suédoise vers le Sud et se retrouve à Stockholm au mois de novembre où il fait d'ailleurs la connaissance de G. Acerbi et de B. Bellotti. Il planifie ensuite son voyage jusqu'à Saint-Petersbourg en traversant l'entrée du Golfe de Botnie et la Mer d'Archipel pour rejoindre les îles d'Åland puis Turku. Dans son ouvrage "*Travels in various countries of Scandinavia (1838)*", troisième partie de son oeuvre "*Travels in various countries of Europe*", il décrit ainsi les difficultés auxquelles il se trouve confronté lors de la traversée du Golfe de Botnie. Il faut dire que l'hiver 1799/1800 fut extrêmement sévère d'après les estimations de R. Jurva : 400 000 km² de glace ont alors recouvert la Baltique. Au mois de décembre 1799, lui et ses compagnons quittent la côte suédoise et embarquent pour Åland. La traversée fut périlleuse à cause des mauvaises conditions météorologiques et de la présence de nombreuses glaces flottantes formées dans les eaux de la Mer d'Åland. Ils continuèrent leur traversée dans l'archipel d'Åland en bateau et en traîneau et l'auteur décrit la rapidité à laquelle la glace

se forme entre chaque passage et l'intensité à laquelle les vagues sont prises en glace. Il narre les dangers encourus sur la mer gelée qui peut de temps à autre laisser place à l'eau libre et la difficulté à naviguer sous de mauvaises conditions météorologiques (figure 23). D'après cette illustration, l'auteur dépeint les difficultés à traverser la mer envahie par les glaces et précise qu'aux îles d'Åland, le thermomètre est descendu à -49°F soit -45°C . Ces quelques données donnent une bonne indication de la rudesse de l'hiver 1799/1800. E. Clarke fait aussi référence aux habitudes des habitants de l'archipel d'Åland dont deux illustrations sont présentées en annexe 19.

En définitive, grâce à la multitude d'informations, certes souvent ponctuelles et discontinues, disponibles dans les anciens travaux, les scientifiques ont pu largement s'appuyer sur ces récits pour reconstituer l'histoire des glaces de mer de la Baltique jusqu'au XIX^{ème} siècle.

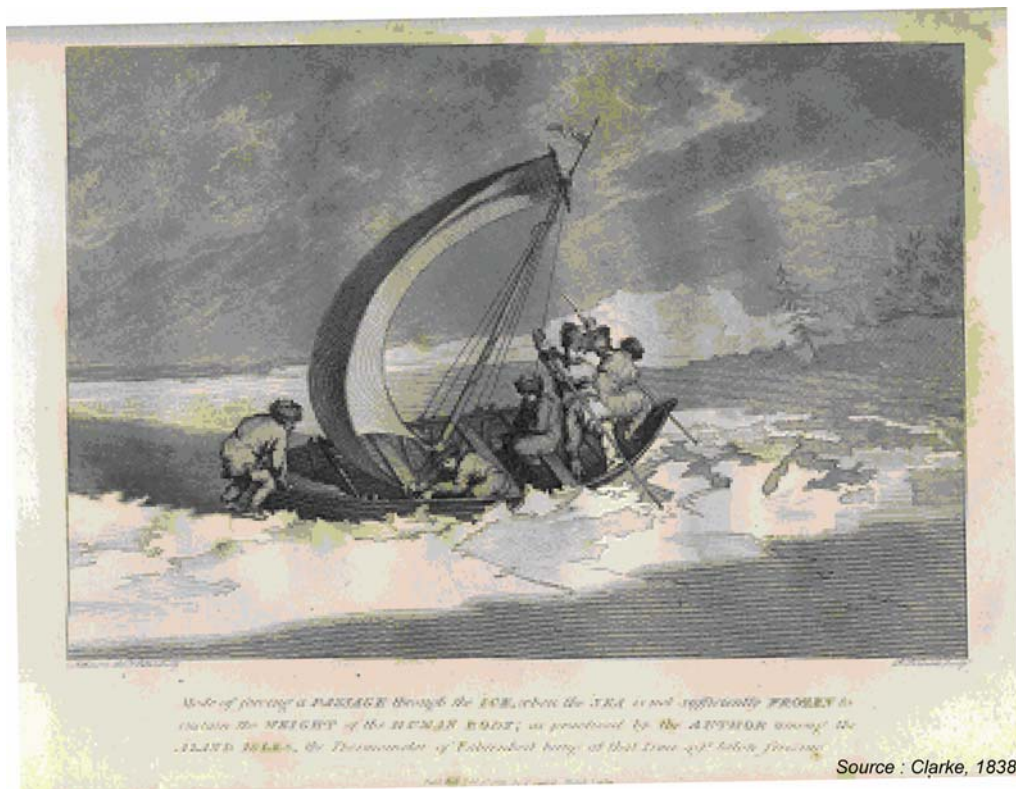


Figure 23 – Illustration de la traversée dans les glaces de l'entrée du Golfe de Botnie en décembre 1799

Figure 23 – Picture of a journey in the ice of the mouth of the Gulf of Bothnia in December 1799

10.1.2 - La reconstitution historique des conditions glacielles en Mer Baltique

Beaucoup d'auteurs se sont consacrés à l'étude historique des glaces de mer de la Baltique. Alors que l'utilisation des sources historiques est inévitable dans de telles recherches, les scientifiques se sont également intéressés à d'autres approches scientifiques concernant le passé climatique de la région. Comme nous l'avons déjà vu, les conditions glacielles sont ici étroitement dépendantes des conditions atmosphériques et météorologiques propres à l'espace étudié. Or l'étude de l'évolution des températures de l'ensemble de la Mer Baltique masque en fait des comportements régionaux assez différenciés.

10.1.2.1 - Le climat en Europe depuis la dernière grande déglaciation : une alternance de réchauffements et de refroidissements relatifs

La plupart des études sur le climat postglaciaire de l'Europe révèlent de manière convergente une variabilité naturelle évidente entre des périodes de réchauffement et de refroidissement climatiques plus ou moins marquées. Les documents écrits, les peintures, les gravures des ouvrages anciens, les biomarqueurs (fossiles, pollens...) ont permis ainsi de déterminer cette variabilité climatique relative. En Europe, la dernière grande déglaciation a laissé place au début de l'Holocène (10 000 BP) à l'interglaciaire actuel pendant lequel les températures ont augmenté. Vers 5000 – 6000 BP, les températures ont même été plus élevées de 2°C en moyenne l'été que celles du XX^{ème} siècle et de 1°C en hiver : c'est l'Optimum climatique. Le froid s'est ensuite intensifié vers 3000 BP avant de laisser place à un réchauffement qui a débuté en 120 av. JC. La seconde moitié du premier millénaire a plutôt connu une période de refroidissement. Dans l'Ouest, le centre et le Nord de l'Europe, il y a eu une longue période avec des températures assez élevées de 900 à 1300 : le réchauffement médiéval - du IX^{ème} au XII^{ème} siècle. Son maximum climatique semble s'être produit entre 1150 et 1250 (Flohn et Fantechi, 1984, 35). Au XIII^{ème} siècle, la détérioration du climat a débuté en Europe du Nord et les hivers sont devenus de plus en plus rudes : la Mer du Nord fut prise en glace entre la Norvège et le Danemark (Tabeaud, 2002). Cette période plus froide, connue sous le nom de Petit Âge Glaciaire, est caractérisée par une période de régression marine et de développement des glaciers montagnards (Flohn et Fantechi, 1984, 25). Ce Petit Âge Glaciaire s'étend du XV^{ème} au début du XIX^{ème} siècle et sur la plupart des régions du globe qui ont vu la neige s'accumuler et la glace s'étendre sur les terres et mers de façon plus importante. Le maximum est atteint entre 1780 et 1830 dans l'hémisphère Nord (Lamb, 1977). Il a été suivi par un réchauffement des températures et marqué par le recul de la glace tant sur les continents que sur la mer dès la fin du XIX^{ème} siècle.

Or le Petit Âge Glaciaire est la période où les premières stations météorologiques sont apparues en Europe. Même si les équipements n'étaient pas standardisés, les stations

fréquemment délocalisées et les mesures discontinues, on a toutefois une bonne indication sur le climat des siècles passés.

10.1.2.2 - Les glaces de mer de la Baltique face aux variations du climat

10.1.2.2.1 - D'après les travaux récents

Alors que de nombreux modèles ont été réalisés pour reconstituer le climat et l'état des glaces de mer, certains scientifiques se sont inspirés, dans une démarche de climatologie « historique », de données anciennes pour évaluer l'état de la banquise depuis le XVI^{ème} siècle. En effet, G. Kolowski et R. Glaser (1999) ont tenté de reconstituer les conditions glacielles de la Baltique, mais seulement celles de l'Ouest de la Baltique depuis 1501. Il ressort de leur étude que le Petit Âge Glaciaire a connu des variations de ses variables climatiques et que la formation des glaces de mer s'en est trouvée légèrement affectée. Ainsi ce sont succédés de légers réchauffements (1501-1553, 1577-1592, 1631-1654, 1711-1762) et refroidissements (1554-1576, 1593-1630, 1655-1710, et 1763-1860). Quelques années auparavant, les mêmes auteurs s'étaient appuyés sur différentes sources pour établir une série dès 1701 : les journaux rapportaient la situation des glaces de mer pour la navigation, les archives des villes portuaires, les journaux des stations le long de la côte allemande, et les séries sur les conditions depuis la fin du XIX^{ème} siècle en Allemagne. Du traitement et de l'analyse de ces sources variées, les auteurs distinguent quatre grandes périodes depuis le début du XVIII^{ème} siècle (Kolowski et Glaser, 1995, 91-93):

- 1701 - 1720 : pendant ces deux décennies, les conditions glacielles de l'Ouest de la Baltique ont été très sévères et sont survenues à la fin de la très froide période du Petit Âge Glaciaire appelé le minimum de Maunder.
- 1721-1760 : cette phase a enregistré de nombreux hivers modérés qui se sont traduits par une claire réduction de la présence des glaces de mer.
- 1761-1860 : à partir des années 1760, les hivers se font de plus en plus sévères et le maximum de sévérité est atteint en 1800. Cette période froide prend fin vers 1860 et correspond à la dernière période de refroidissement du Petit Âge Glaciaire.
- 1861-1993 : le régime actuel comprend trois courts intervalles avec un durcissement des hivers (décennies 1890, 1940 et 1980) et une longue période d'adoucissement (de 1900 aux années 1920).

En 1996, A. Omstedt et L. Nyberg ont tenté, à partir d'un modèle, d'évaluer les conséquences de changements thermiques positifs et négatifs sur l'état de la banquise de la Mer Baltique. Comme nous l'avons évoqué dans le chapitre 4, depuis 1720, l'extension maximale des glaces de mer de la Baltique montre de larges variations, la banquise

occupant de 12 à 100 % la surface totale. Les résultats du modèle présentent des variations saisonnières, interannuelles et surtout régionales de la température de surface et des conditions glacielles de la Mer Baltique. Ils insistent bien sur le fait que les eaux des sous-bassins de la Baltique ne réagissent pas avec la même intensité face aux variations thermiques. Les températures de surface de la mer indiquent que la Mer Baltique est plus sensible au changement climatique notamment en hiver, un léger changement dans les températures de l'air en hiver causerait donc de grandes différences dans l'extension des glaces (Omstedt et Nyberg, 1996, 655). Ainsi, un réchauffement entraînerait la diminution du nombre d'hivers qualifiés de sévère accentuant le climat vers des conditions plus océaniques. En revanche, un refroidissement augmenterait le nombre d'hivers sévères et entraînerait des conditions sub-arctiques (*ibid.*, 662).

Nous avons déjà démontré la forte corrélation entre l'extension maximale et les températures de l'air à Oulu (graphique 15). Les résultats de la modélisation du climat de la Mer Baltique analysés par D. Hansson et A. Omstedt (2008) montrent que dans la plupart des cas, les décennies qui ont constaté les plus froides et plus chaudes températures de l'eau ont également enregistré les plus froides et plus chaudes températures de l'air. Au cours du XX^{ème} siècle, les températures de l'eau de la Baltique ont révélé trois périodes chaudes : les décennies 1930, 1950 et 1990. Sur une perspective de temps plus longue, au cours des 500 dernières années, les décennies les plus chaudes ont été les années 1730 et 1740 et 1930 et 1990. Au cours de ce dernier siècle, il n'y a pas eu de périodes froides significatives excepté un léger refroidissement dans les années 1970. La décennie 1940 a été la plus froide. La température annuelle de l'air la plus chaude des 500 dernières années a été atteinte en 1989, qui a aussi enregistré la plus faible étendue de glace (après l'hiver 2008) (Hansson et Omstedt, 2008, 775). La forte interaction entre l'étendue de la banquise et les températures de l'air permet de mieux comprendre les variations Ainsi, les années 1930 sont celles qui ont connu le moins de glace de mer en terme de superficie. Le XX^{ème} siècle est aussi celui dont la banquise s'est le moins étendue. Les auteurs font remarquer qu'au cours de la seconde moitié du dernier millénaire, la Mer Baltique a toujours pris en glace.

Récemment, Eberhard Hagen et Rainer Feistel (2005) ont établi un indice hivernal de la Baltique (*Baltic winter index WIBIX*) qui prend en compte l'indice NAO, les anomalies du niveau de la mer et l'étendue maximale du couvert de glace. Cet indice permet de discerner deux types d'hiver : maritime et continental depuis le XVII^{ème} siècle. Les auteurs concluent que les régimes climatiques continentaux concernent les années 1677-1701, 1740-1902, 1940-1987, et les régimes climatiques maritimes les années 1702-1739, 1903-1939, et les années qui suivent 1988 (Hagen et Feistel, 2005, 220).

10.1.2.2.2 – D'après la date d'ouverture du port de Riga

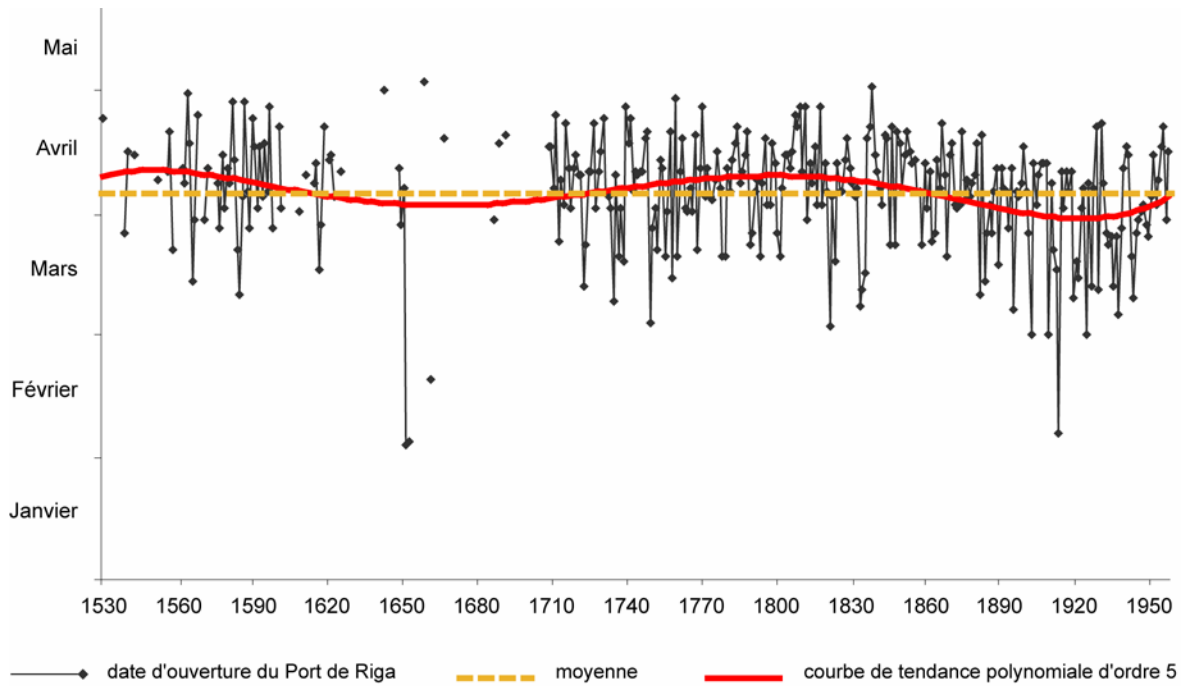
Le Port de Riga a enregistré et gardé en archives les dates d'ouverture du port au printemps depuis 1530. Bien entendu, chaque année la date d'ouverture du port de Riga peut être considérée comme le moment où les glaces de mer ont disparu et la navigation peut reprendre son activité. Elle fournit donc une information essentielle sur les périodes de débâcle dans le Golfe de Riga.

D'après les données collectées par Speerschneider, Betin et Preobazensky (*in* Lamb, 1977), nous avons pu tracer la courbe des dates d'ouverture du port sur le graphique 39. Malgré une série incomplète, ces données présentent une large variabilité sur la période 1530-1958 avec une moyenne évaluée au 5 avril. Le graphique fait bien figurer la quasi-totalité du Petit Âge Glaciaire qui se caractérise par une valeur basse des températures moyennes à long terme et une augmentation de la variabilité des températures d'une année à l'autre. Ainsi, d'après la courbe polynomiale d'ordre 5, on peut, pensons nous, distinguer quatre grandes périodes :

- 1530 – 1610 : la débâcle a plutôt été tardive.
- 1610 – 1700 : il est difficile de constater une quelconque tendance au vue de la série interrompue. Malgré cela, une très nette variabilité est notable, d'autant plus que la décennie 1650 a enregistré à la fois la date d'ouverture la plus précoce et la plus tardive de la série entière (soit -9 jours/siècle que la période précédente⁴⁶).
- 1700 – 1860 : la débâcle a été généralement tardive (soit +5 jours/siècle que la période précédente³) enregistrant le maximum du Petit Âge Glaciaire.
- 1860 – 1950 : la débâcle a été précoce (soit -12 jours/siècle que la période précédente³) surtout vers 1910 mais avec toutefois des débâcles tardives notables vers 1930 et 1940. Après 1950, la courbe polynomiale laisse penser que la débâcle s'est fait tardivement.

Même si ces résultats ne concernent que le fond du Golfe de Riga, elles reflètent toutefois l'idée d'une variabilité nette des conditions glacielles en Mer Baltique de laquelle on peut déduire les tendances climatiques de la région.

⁴⁶ Les écarts de jours entre les maximum des périodes à débâcle tardive et minimum à débâcle précoce ont été estimés par S. Jevrejeva (2001, 58) qui s'est appuyée sur des données similaires.

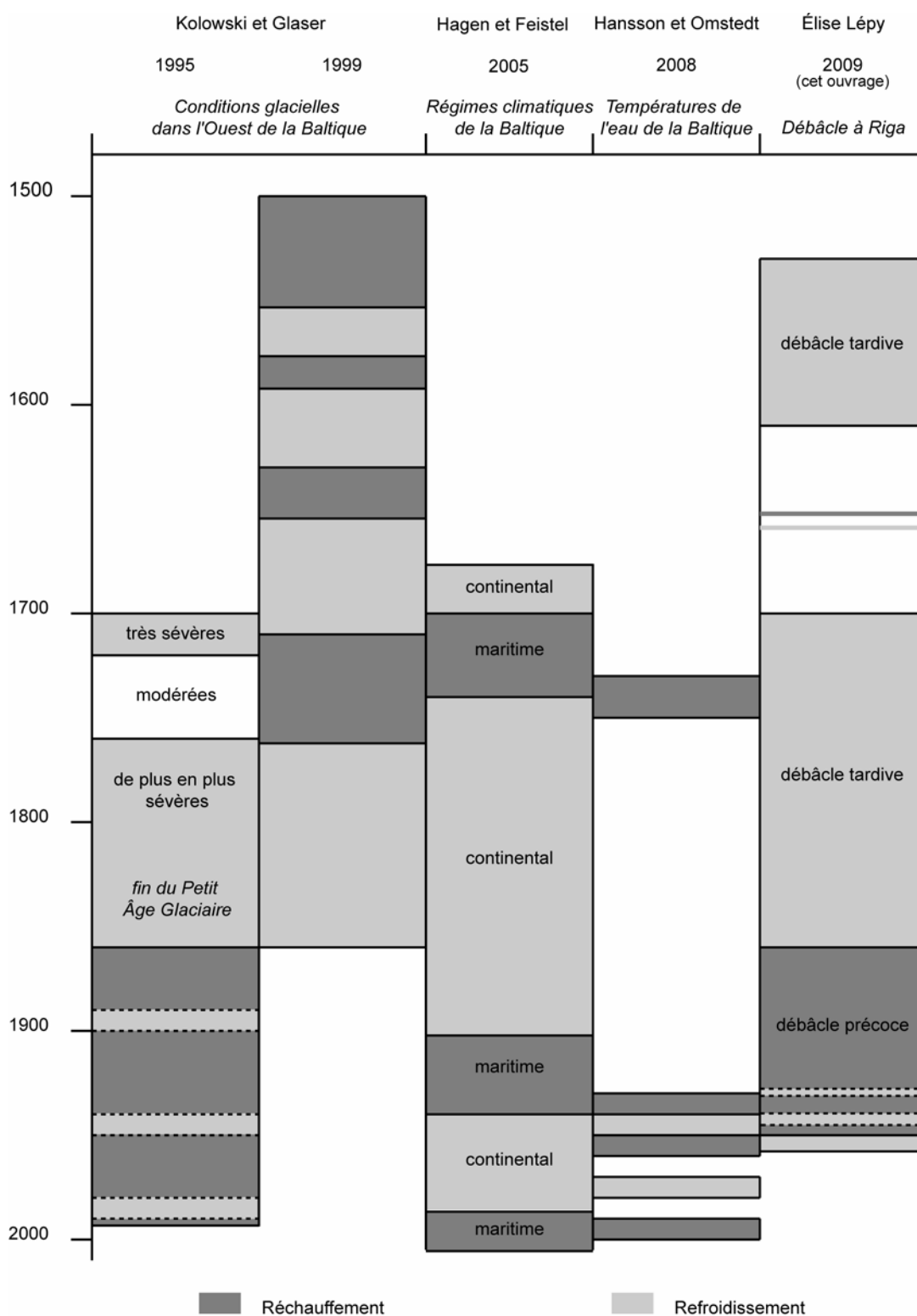


Réalisé par Élise Lépy
d'après les données collectées par Betin et Preobazensky (1959) et Speerschneider (1915), in Lamb, 1977

Graphique 39 – Date d'ouverture du Port de Riga (débâcle) de 1530 à 1958
Graph 39 – Open date of the Port of Riga (ice melting) from 1530 to 1958

10.1.2.3 – Synthèse

Les résultats de ces recherches sont résumés et comparés dans la figure 24 qui illustre de manière générale des périodes de réchauffement et de refroidissement récents à contemporains en Mer Baltique. Les différences et décalages existant tiennent, à notre sens, à deux raisons. Tout d'abord, l'espace d'étude considéré n'est pas toujours le même : alors que certains travaux ont porté sur la Baltique entière, d'autres y ont étudié davantage une région particulière. D'autre part, les éléments considérés dans chaque cas ne sont pas identiques (date d'ouverture du port de Riga, température de l'eau de surface, régimes climatiques). Malgré cela, le document renvoie une information suffisante, même si elle est généralisée, sur les périodes de réchauffement (raccourcissement de la saison glacielle, diminution de l'étendue de la banquise et de l'épaisseur de glace) et de refroidissement (augmentation de toutes les caractéristiques glacielles) qui ont affecté la Mer Baltique et sa banquise.



Réalisé par Élise Lépy

Figure 24 - Périodes de réchauffement et de refroidissement selon différents auteurs

Figure 24 - Warming and cooling periods according to different authors

De manière générale, la Mer Baltique montre, d'une part, une tendance relative au raccourcissement des saisons glacielles variant de 20 à 30 jours par siècle selon les stations côtières et, d'autre part, une diminution de 10% de son couvert de glace en un

siècle (Leppäranta et Seinä, 1985, 103). Néanmoins, la probabilité d'occurrence de la formation de la banquise reste variable – de 32% dans le sud de la Mer Baltique à 100% dans les régions les plus septentrionales du Golfe de Botnie durant le XX^{ème} siècle (Jevrejeva et *al.*, 2004, 226). Les différents sites de la Mer Baltique ne sont donc pas tous soumis aux mêmes influences et par conséquent ne présentent pas nécessairement une évolution similaire de leurs conditions glacielles. Ainsi, à ce titre les cas de la Baie de Botnie et du Golfe de Riga peuvent constituer des exemples pertinents de particularités régionales.

10.2 – L'ANALYSE REGIONALE FINE : LE CAS DE LA BAIE DE BOTNIE ET DU FOND DU GOLFE DE RIGA

Notre analyse régionale du changement climatique au travers les cas de la Baie de Botnie et du fond du Golfe de Riga retrace donc leur histoire climatique et glacielle récente depuis le XIX^{ème} siècle. Elle repose ainsi sur l'étude de l'évolution des températures aux stations d'Oulu et Riga, et celle du comportement des glaces de mer dans le fond des deux golfes.

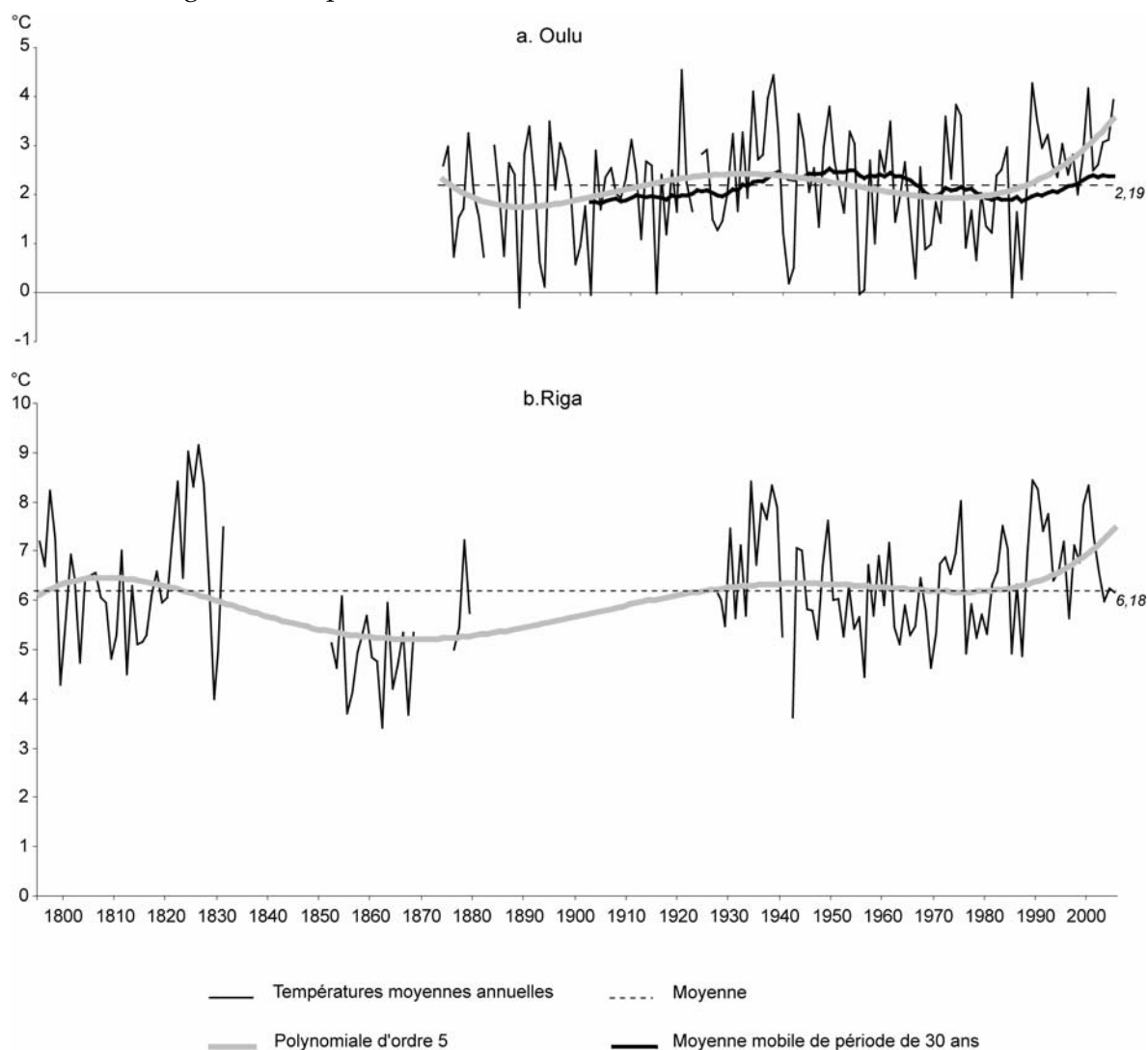
10.2.1 - L'évolution des températures aux stations d'Oulu et de Riga

Notre contribution à l'étude du changement climatique dans ces deux domaines, se fonde principalement sur les observations à long terme de certains paramètres telles la température et les précipitations. Comme la température est l'élément fondamental à la prise en glace de l'eau de mer, il semble alors approprié d'analyser les séries à long terme des stations d'Oulu et de Riga. Or de telles observations et mesures ont débuté en Lettonie au XVIII^{ème} siècle et en Finlande au XIX^{ème} siècle.

La température est la variable sur laquelle on dispose du plus d'enregistrements. Ainsi, à Oulu, la série des températures mensuelles et annuelles remontent à 1873. Elle donne donc une information claire sur l'évolution des températures depuis plus d'un siècle (graphique 40a). L'évolution annuelle des températures *y* montre qu'une augmentation de 0,80°C est apparue entre la fin du XIX^{ème} siècle et la fin des années 1930. Ensuite un léger déclin thermique peut être distingué aux débuts des années 1940, avant une stabilisation des températures qui, dans les années 1960, tendent à nouveau à se refroidir. Puis les années 1970 annoncent une nouvelle hausse des températures qui est toutefois freinée par les températures froides des années 1980. La distribution fréquentielle des températures moyennes annuelles par décennie (graphique 41) permet encore de dégager davantage les périodes relatives de « réchauffement » et de « refroidissement » à Oulu. Ainsi, la décennie 1960 est celle qui a enregistré le plus

d'années « froides », c'est-à-dire inférieures au premier quartile. Les décennies 1870, 1900 et 1920 ont entre quatre et six hivers dont les températures moyennes annuelles basses sont comprises entre le premier quartile et la médiane. Les trois dernières décennies ont plus de 60% de leurs années qui se situent au-delà de la médiane.

La série de températures à Riga est certes longue – de 1795 à 2005 – mais présente de nombreuses ruptures. Il est toutefois possible de discerner la variabilité interannuelle depuis la fin du XVIII^{ème} siècle. Ainsi, il est visible sur le graphique 40b qu'une phase de réchauffement est apparue dans le premier quart du XIX^{ème} siècle et qu'une phase de températures annuelles basses s'est produite au cœur de ce même siècle. Au XX^{ème} siècle, la courbe de Riga présente des analogies évidentes avec celle d'Oulu avec un réchauffement relatif à la fin de la décennie 1930 suivi de températures froides vers 1940. De manière similaire, les températures moyennes annuelles des deux stations ont tendance à augmenter depuis le début des années 1990.



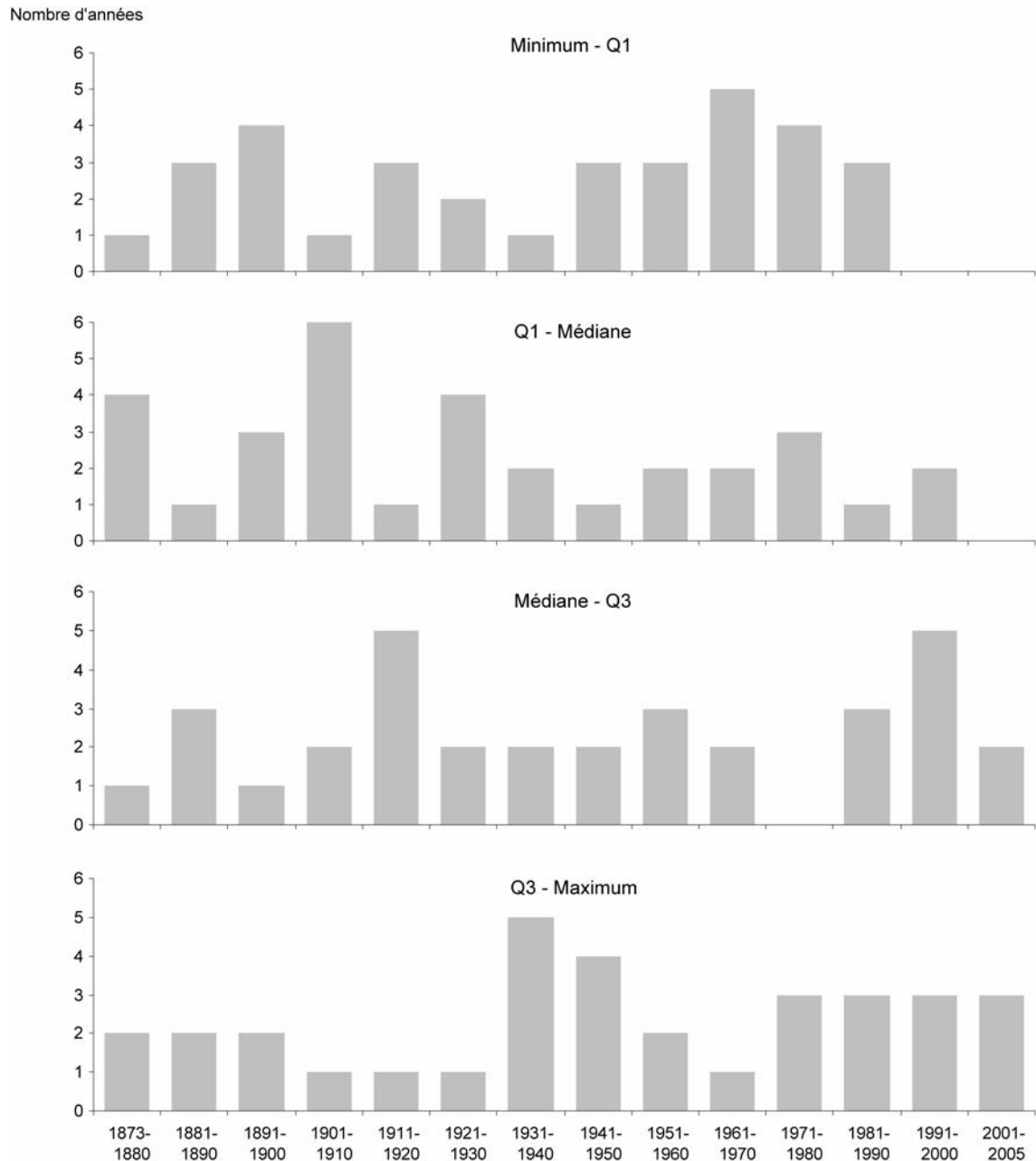
Réalisé par Élise Lépy

Graphique 40 – Températures moyennes annuelles et différentes courbes de tendance

a. De 1873 à 2005 pour Oulu ; b. De 1795 à 2005 pour Riga

Graph 40 – Annual average temperatures and various trendlines

a. From 1873 to 2005 at Oulu ; b. From 1795 to 2005 at Riga



Réalisé par Élise Lépy

Graphique 41 – Distribution fréquentielle des températures moyennes annuelles par décennie de 1873 à 2005 à Oulu

Graph 41 – Frequential distribution of annual average temperatures by decade from 1873 to 2005 at Oulu

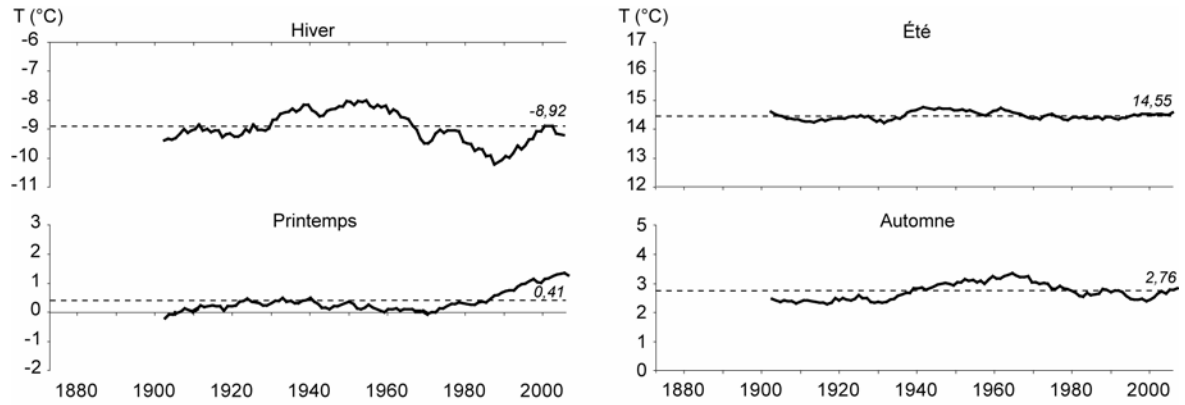
Afin de mieux appréhender l'évolution des phénomènes cryomarins, il semble opportun de s'intéresser à l'évolution thermique saisonnière et mensuelle. Dans les deux cas, seules les courbes de tendances à moyenne mobile sont représentées pour faciliter la lecture des graphiques 42 et 44. Ainsi, dans le cas des saisons, les moyennes mobiles avec intervalle de 30 ans sont utilisées afin d'obtenir une distribution plus équilibrée des données. Cet intervalle est internationalement reconnu comme l'unité basique de temps

dans les recherches en climatologie (Heino, 1978, 4). La distribution saisonnière se lit ainsi : l'hiver comprend les mois de décembre à février, le printemps de mars à mai, l'été de juin à août et l'automne de septembre à novembre. Dans le cas des températures moyennes mensuelles, un intervalle de 10 ans est utilisé dans le but de mieux se rendre compte des variations. Les graphiques indiquent également les moyennes de températures pour la période 1873-2005 à Oulu et 1926-2005 à Riga. Pour des raisons évidentes de série incomplète, les températures moyennes saisonnières et mensuelles à Riga recouvrent la période 1926-2005.

Les températures saisonnières à long terme permettent d'évaluer et de comparer les saisons entre elles. Ainsi les températures hivernales montrent des fluctuations bien marquées d'une année à une autre comparativement à celles des autres saisons à Oulu (graphique 42). La moyenne mobile de l'hiver est assez semblable à celle des températures annuelles, quoi que plus exagérée. Cependant l'intervalle de 30 ans ne permet pas de marquer les extrêmes. Ainsi, les premiers hivers des années 1940 sont représentés par un léger déclin alors qu'ils ont été extrêmement froids. Si l'on considère la seule courbe hivernale, il est difficile de discerner un changement climatique : les hivers des décennies 1930 – 1960 ont été bien plus chauds en moyenne, que les hivers de la fin du XX^{ème} siècle. En revanche, le printemps qui présente une courbe à peu près stable jusqu'à la moitié des années 1980, montre un net réchauffement des températures à la fin du siècle. L'été, est, quant à lui, resté stable et l'automne a enregistré un léger réchauffement des années 1945 à 1975.

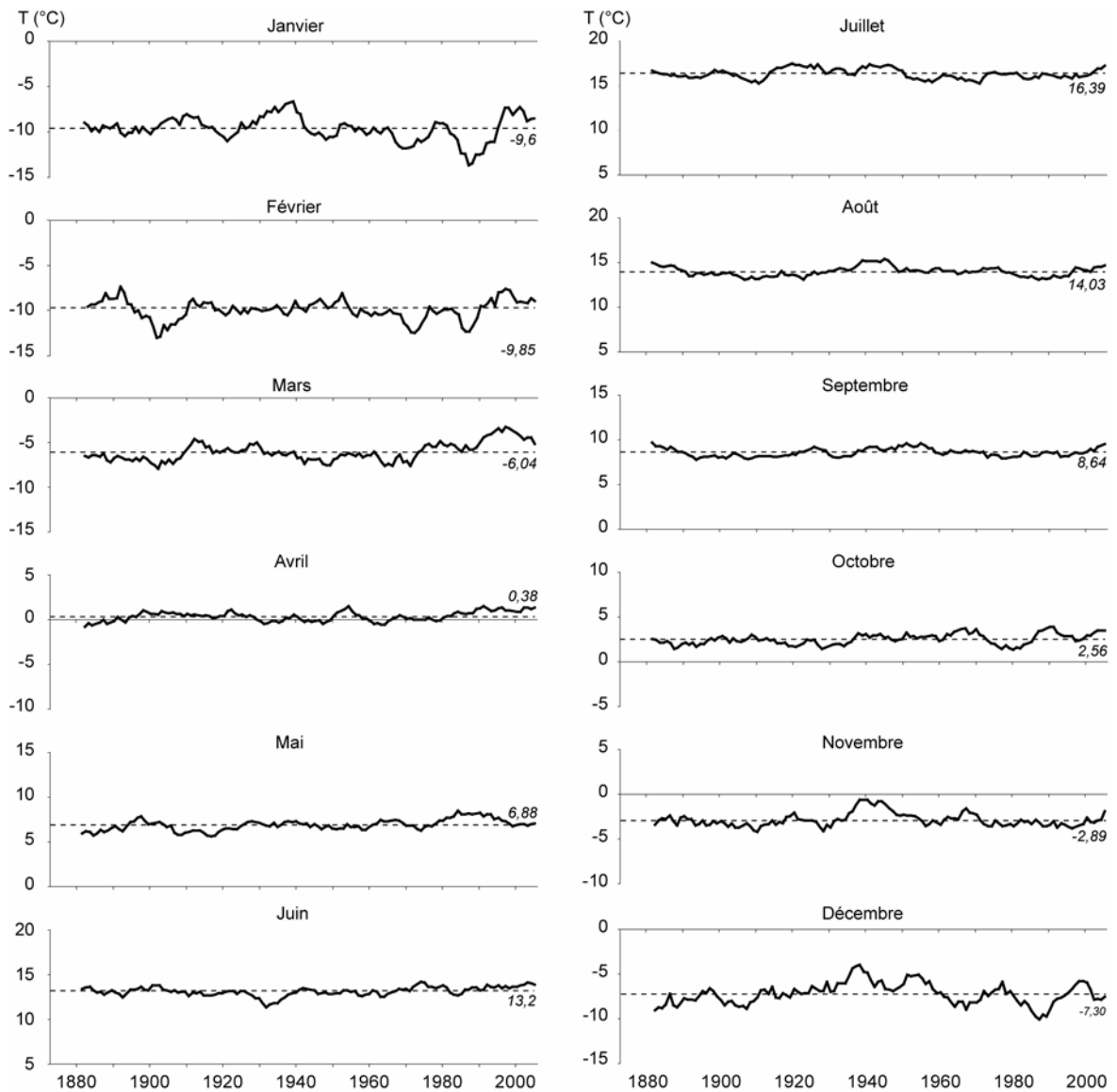
Les fluctuations sont davantage marquées à Oulu qu'à Riga (graphiques 42 et 44) : l'amplitude thermique de la moyenne mobile en hiver est respectivement de 2,20°C et de 1,8°C, au printemps de 1,57°C et de 1,3°C, en été de 0,55°C et de 0,8°C, et en automne de 1,06°C et de 0,4°C. Dans les deux cas, l'hiver est la saison qui connaît le plus de variabilité et l'été le moins. Ces différences thermiques entre les deux stations s'expliquent par leur climat qui dans le premier cas est davantage continental que dans le second, qui lui subi d'une part les influences océaniques et d'autres part les variations des latitudes tempérées.

L'évolution des températures moyennes mensuelles confirme, dans les deux cas (graphiques 43 et 45), que l'hiver est la saison qui subit le plus de variations. Effectivement, les mois de décembre à mars sont ceux qui enregistrent les fluctuations les plus importantes de l'année. De plus, il est assez visible que la dernière décennie du XX^{ème} siècle et le début du siècle présent ont enregistré des températures hivernales plus chaudes que la moyenne. En revanche, les autres mois de l'année connaissent des fluctuations plus faibles qui restent proches de la moyenne.



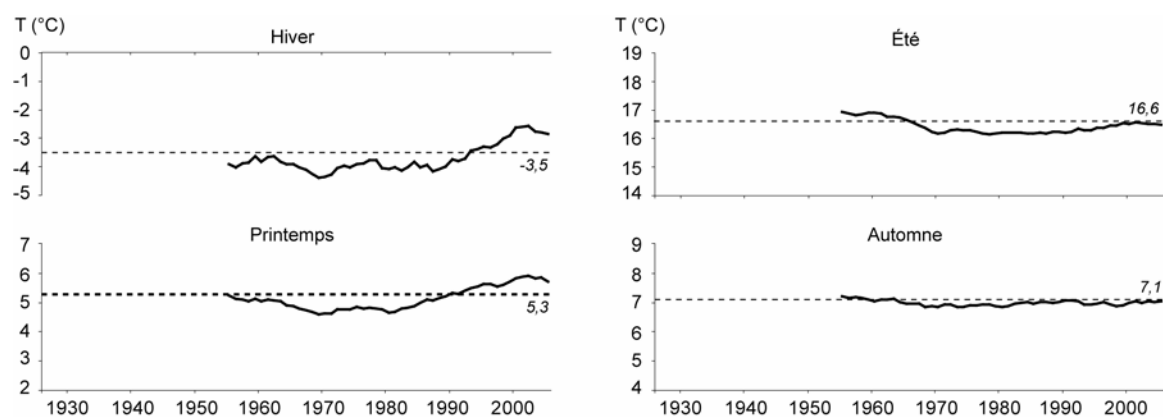
Réalisé par Élise Lépy

Graphique 42 – Moyenne mobile de 30 ans des températures moyennes saisonnières de 1873 à 2005 à Oulu
 Graph 42 – 30-year-mobile average of seasonally average temperatures from 1873 to 2005 at Oulu



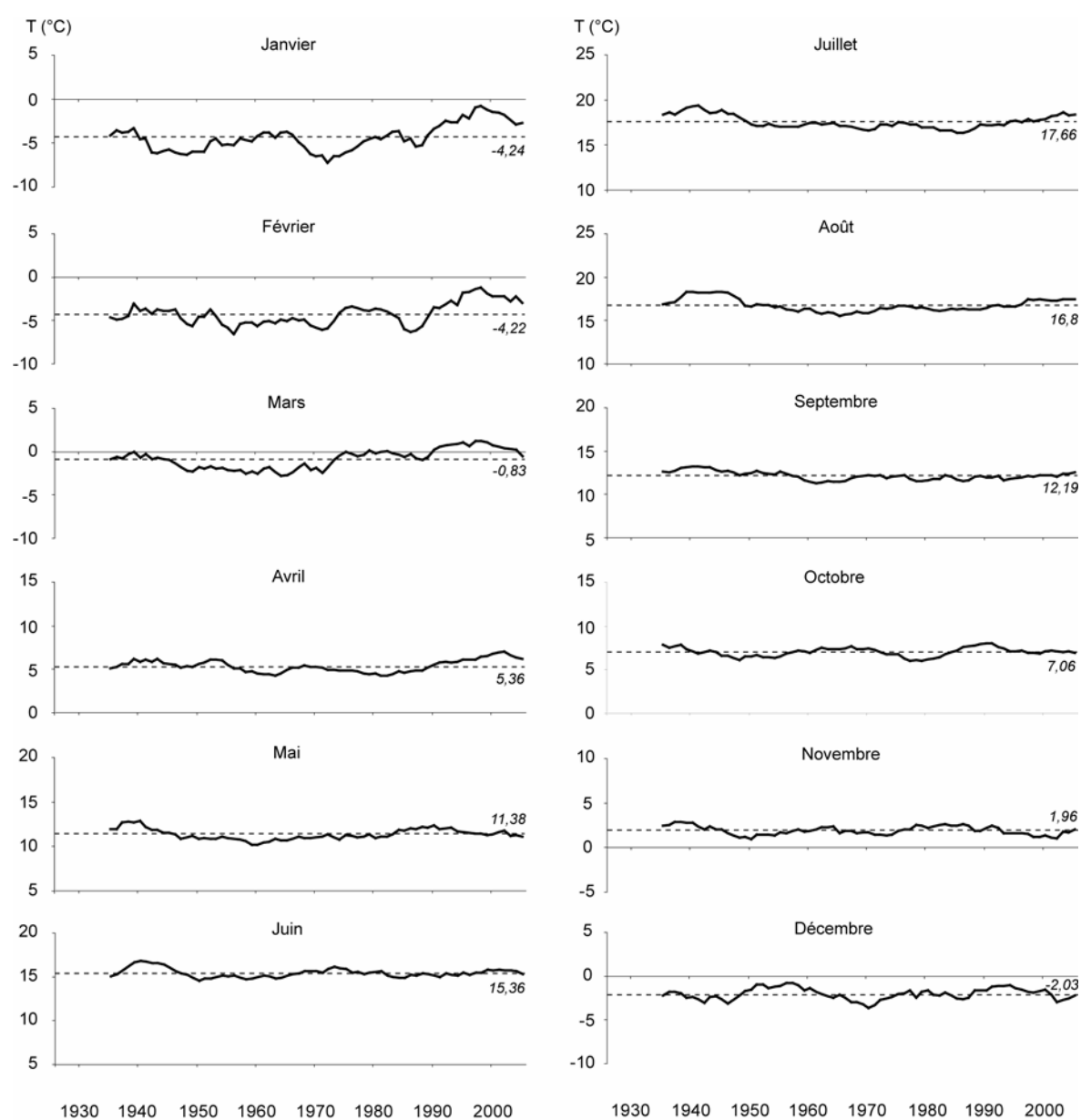
Réalisé par Élise Lépy

Graphique 43 – Moyenne mobile de 10 ans des températures moyennes mensuelles de 1873 à 2005 à Oulu
 Graph 43 – 10-year-mobile average of monthly average temperatures from 1873 to 2005 at Oulu



Réalisé par Élise Lépy

Graphique 44 – Moyenne mobile de 30 ans des températures moyennes saisonnières de 1926 à 2005 à Riga
 Graph 44 – 30-year-mobile average of seasonally average temperatures from 1926 to 2005 at Riga



Réalisé par Élise Lépy

Graphique 45 – Moyenne mobile de 10 ans des températures moyennes mensuelles de 1926 à 2005 à Riga
 Graph 45 – 10-year-mobile average of monthly average temperatures from 1926 to 2005 at Riga

10.2.2 - L'évolution des glaces de mer dans la Baie de Botnie et dans le fond du Golfe de Riga

Les données recensées pour les stations côtières de la Baie de Botnie et le Golfe de Riga sont très variables dans le temps. Ainsi, la côte suédoise est celle qui a enregistré les plus anciennes données d'embâcle et de débâcle des eaux côtières, de 1870 à 2003. Une telle série de données permet d'apprécier réellement l'évolution des dates de prise en glace et de fonte. Les stations finlandaises, quant à elles, présentent des graphiques (50 à 54) comprenant la période 1937 – 2005. Pour le Golfe de Riga, les données collectées ne concernent malheureusement que la période 1888-1942. L'étude de différentes stations côtières permet toutefois de se rendre compte si les phénomènes observés sont généralisables ou si chaque cas est particulier.

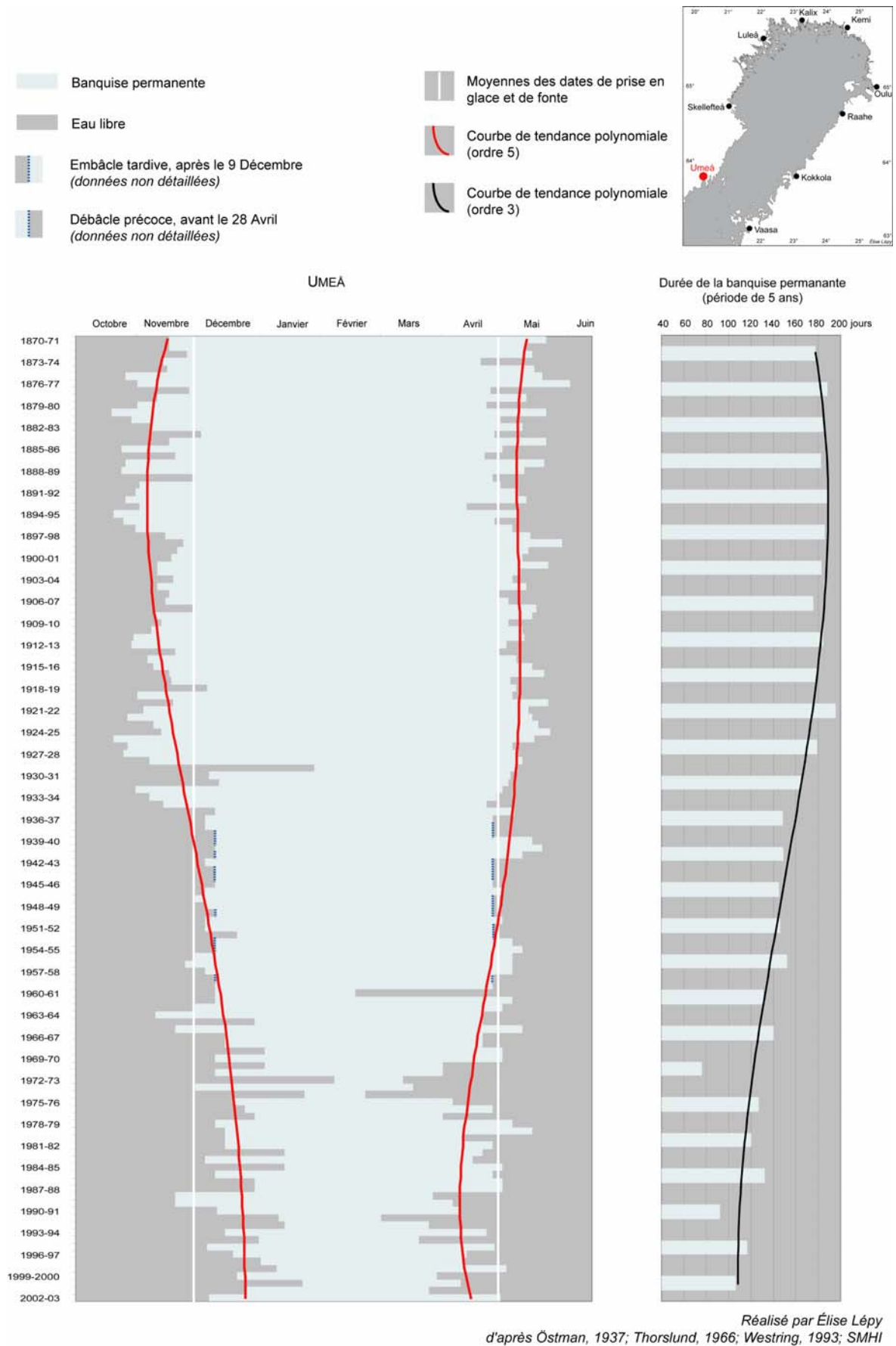
10.2.2.1 – La côte suédoise de la Baie de Botnie

À Umeå (graphique 46), située sur la côte Ouest à l'entrée de la Baie de Botnie, la durée de la saison glacielle était souvent de plus de 180 jours jusqu'aux années 1920 puis s'est nettement réduite, et elle était d'un peu plus de 100 jours au début du XXI^{ème} siècle. Ce raccourcissement de la durée de la présence de la banquise s'explique par une prise en glace de plus en plus tardive à partir de la décennie 1930 et par une précocité de la débâcle visible à partir de la fin des années 1950. Il est évident que dans ce cas-ci, la seconde moitié du XX^{ème} siècle a connu une nette réduction de la durée de la saison des glaces de mer accompagnée de fluctuations de plus grande ampleur.

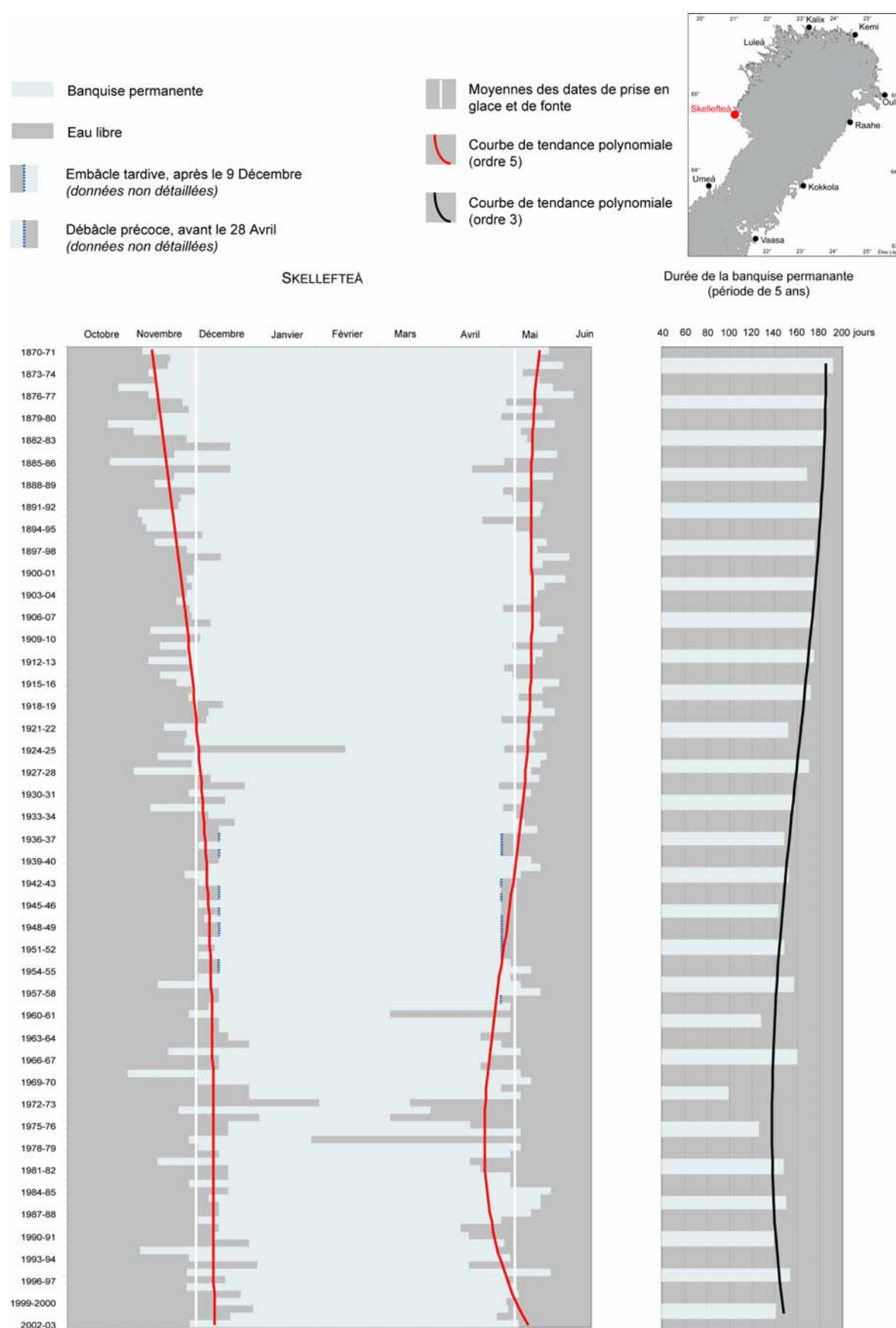
Toujours sur la côte Ouest mais située plus au Nord, la station côtière de Skellefteå (graphique 47) ne présente pas exactement les mêmes tendances. En effet, depuis 1870 les dates de prise en glace se sont faites de plus en plus tardivement jusqu'à leur stabilisation dans les années 1950. En revanche les périodes de débâcle ont commencé à être plus précoces que la moyenne à partir des années 1940 avec des situations extrêmes dans les années 1970 qui ont vu des fontes se déclencher début mars voire fin février. Il est aussi remarquable que les années froides de 1984 à 1987 ont connu la banquise plus tardive (mais pas de façon exceptionnelle), puis que le début des années 1990 a été chaud et les débâcles ont y été plus précoces que la moyenne. Toutes ces observations expliquent la lente diminution de la saison glacielle qui a vu le nombre de jours passer de plus de 180 jours dans la décennie 1870 à 170 jours à la fin des années 1920 avant de se stabiliser à 160 jours pendant deux décennies. La durée de la saison glacielle s'est ensuite largement raccourcie avant de se stabiliser de nouveau à la fin du siècle dernier (150 jours en moyenne).

À Luleå (graphique 48), la saison glacielle est inévitablement plus longue. Elle dépassait les 200 jours à la fin du XIX^{ème} siècle et jusque dans les années 1930 où elle a commencé à diminuer de manière progressive jusqu'à de nos jours. Au début des années 2000, elle comptait 40 jours de moins qu'au siècle précédent. Cette progressive diminution s'explique par les prises en glace qui se sont faites un peu plus tardivement, seulement à partir des années 1960, alors que les débâcles se sont déroulées à peu près dans les mêmes dates tout au long de la période étudiée. Seules les dates d'embâcle ont donc connu des variations.

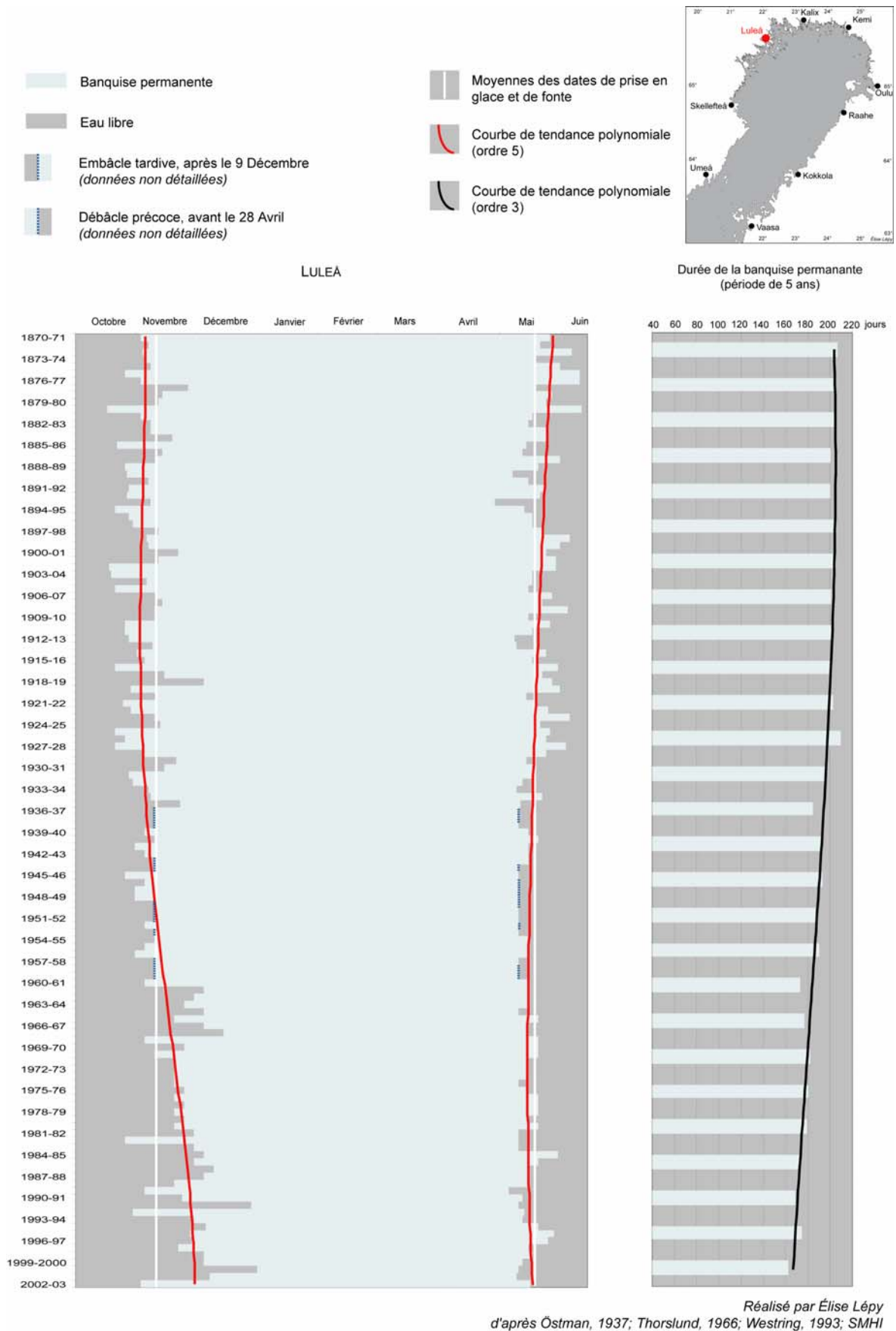
On retrouve un schéma similaire pour la station de Kalix (graphique 49), la plus septentrionale de la Baie de Botnie, qui présente toutefois des saisons glacielles plus longues, certaines atteignant 220 jours. Les dates de prise en glace et de fonte printanière ont évolué de manière similaire à celles de Luleå.



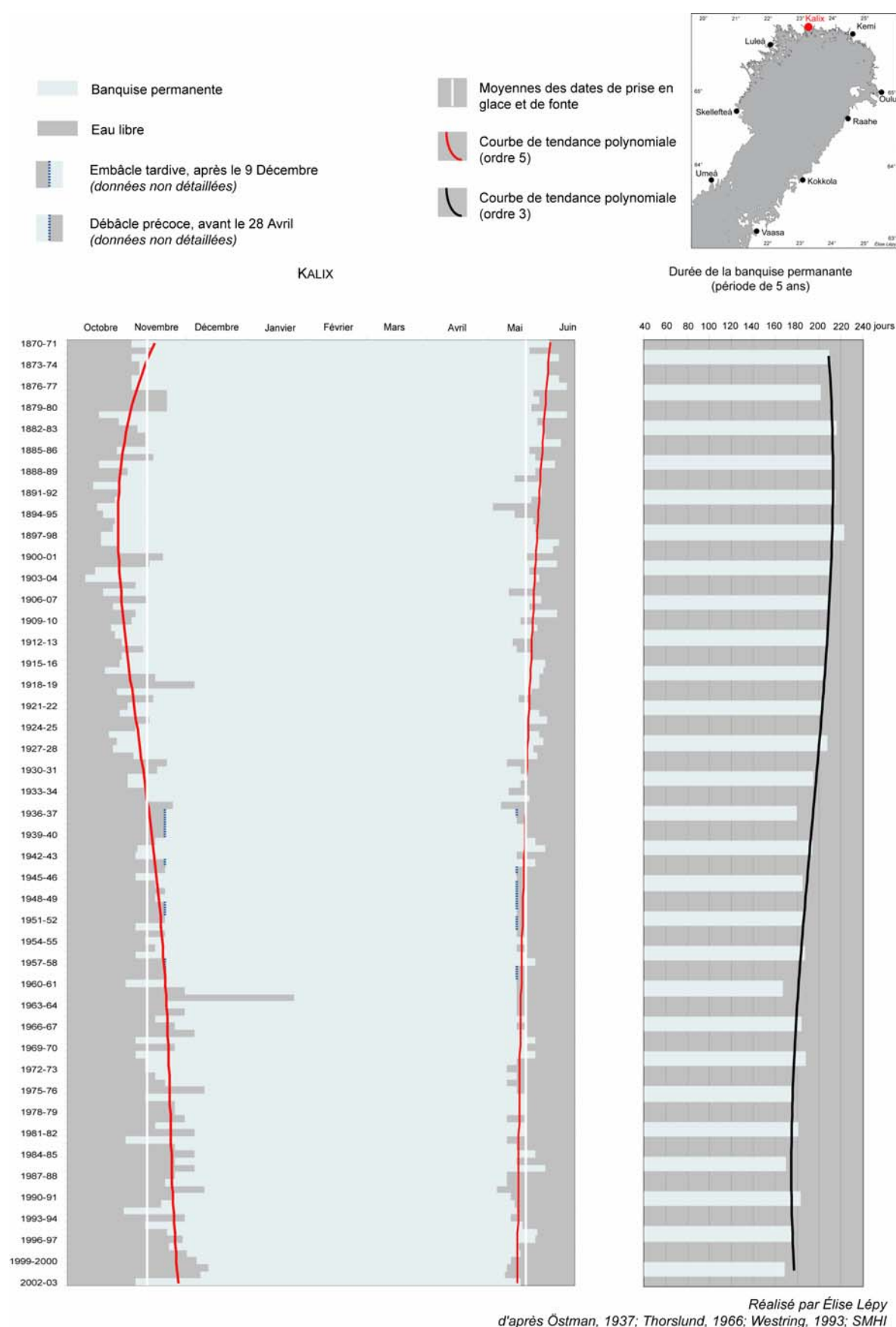
Graphique 46 – Comportement des glaces de mer à Umeå de 1870 à 2003
Graph 46 – Sea ice characteristics at Umeå from 1870 to 2003



Graphique 47 – Comportement des glaces de mer à Skellefteå de 1870 à 2003
Graph 47 – Sea ice characteristics at Skellefteå from 1870 to 2003



Graphique 48 – Comportement des glaces de mer à Luleå de 1870 à 2003
Graph 48 – Sea ice characteristics at Luleå from 1870 to 2003



Graphique 49 – Comportement des glaces de mer à Kalix de 1870 à 2003
 Graph 49 – Sea ice characteristics at Kalix from 1870 to 2003

10.2.2.2 – La côte finlandaise de la Baie de Botnie

Les premières observations des glaces de la mer côtière finlandaise datent du XIX^{ème} siècle. Mais les séries ayant été interrompues à maintes reprises, il ne figure sur les graphiques suivants que l'examen de la période 1937 – 2005. Ces données précisent les périodes entre l'apparition des premières glaces flottantes et la présence de la banquise permanente appelée période d'embâcle, celles entre la décomposition de la banquise permanente et la disparition des dernières glaces flottantes appelée débâcle. Pour faciliter les comparaisons entre chaque site, la durée de la saison glacielle a également été calculée sur une période de 5 ans.

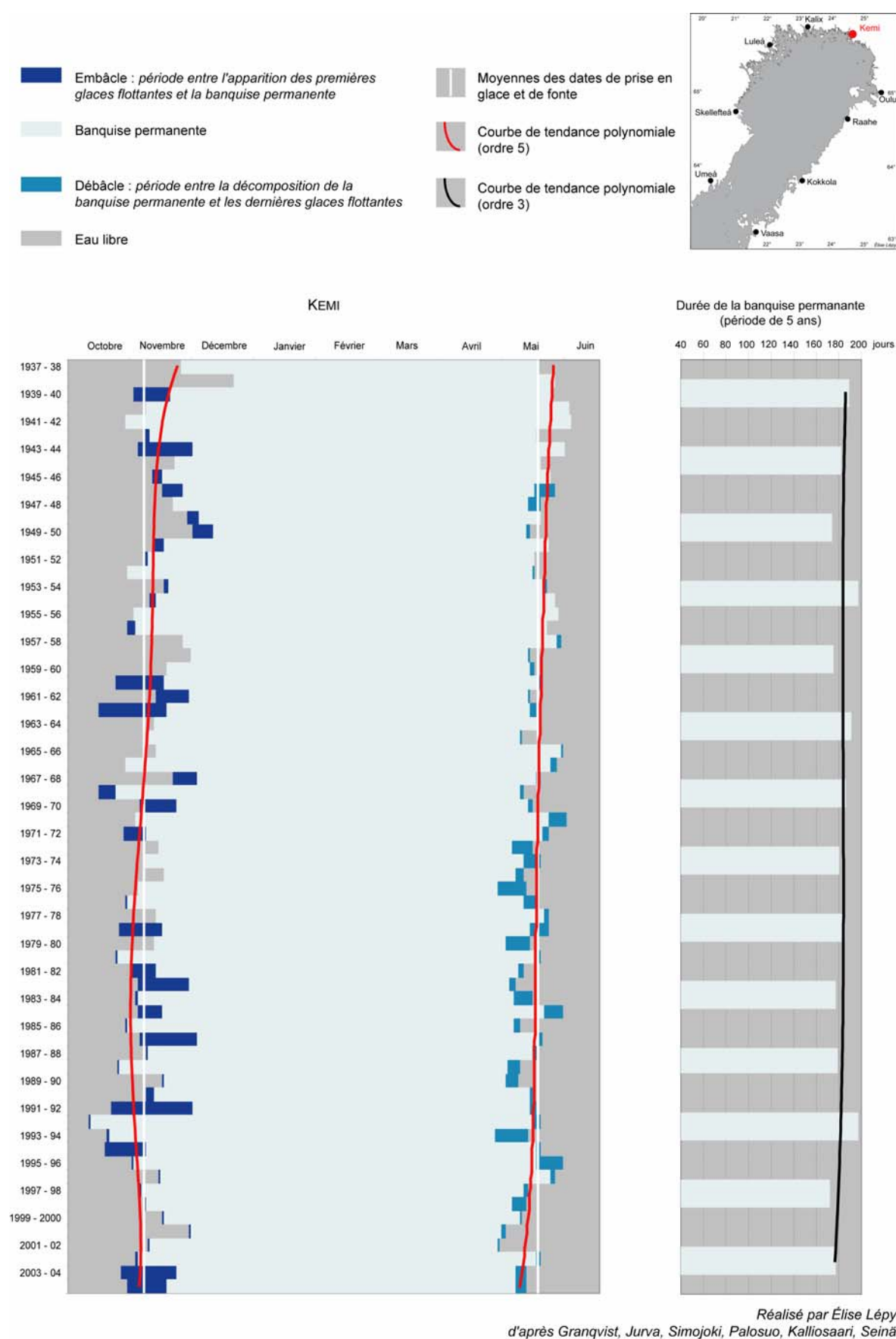
Il est difficile de discerner une tendance significative pour la station finlandaise la plus septentrionale, Kemi (graphique 50). En effet, la banquise permanente est présente en moyenne plus de 180 jours dans l'année et a très peu évolué au cours du XX^{ème} siècle : un rallongement a eu lieu au début des années 1950 et de légers raccourcissements (170 jours) à la fin des décennies 1940, 1950 et 1990. Un phénomène particulier peut toutefois être noté : une légère précocité des prises en glace par rapport à la moyenne est apparue à partir des années 1970.

On retrouve le même particularisme à la station côtière d'Oulu (graphique 51) puisqu'un surprenant décalage, plus prononcé que pour Kemi, est visible pour les dates de prises en glace et de fonte à partir des années 1975. Tout comme la station précédente, il est difficile d'en dégager une tendance significative puisque les saisons glacielles ont souvent été plus ou moins de 170 jours avec un raccourcissement à la fin des années 1940.

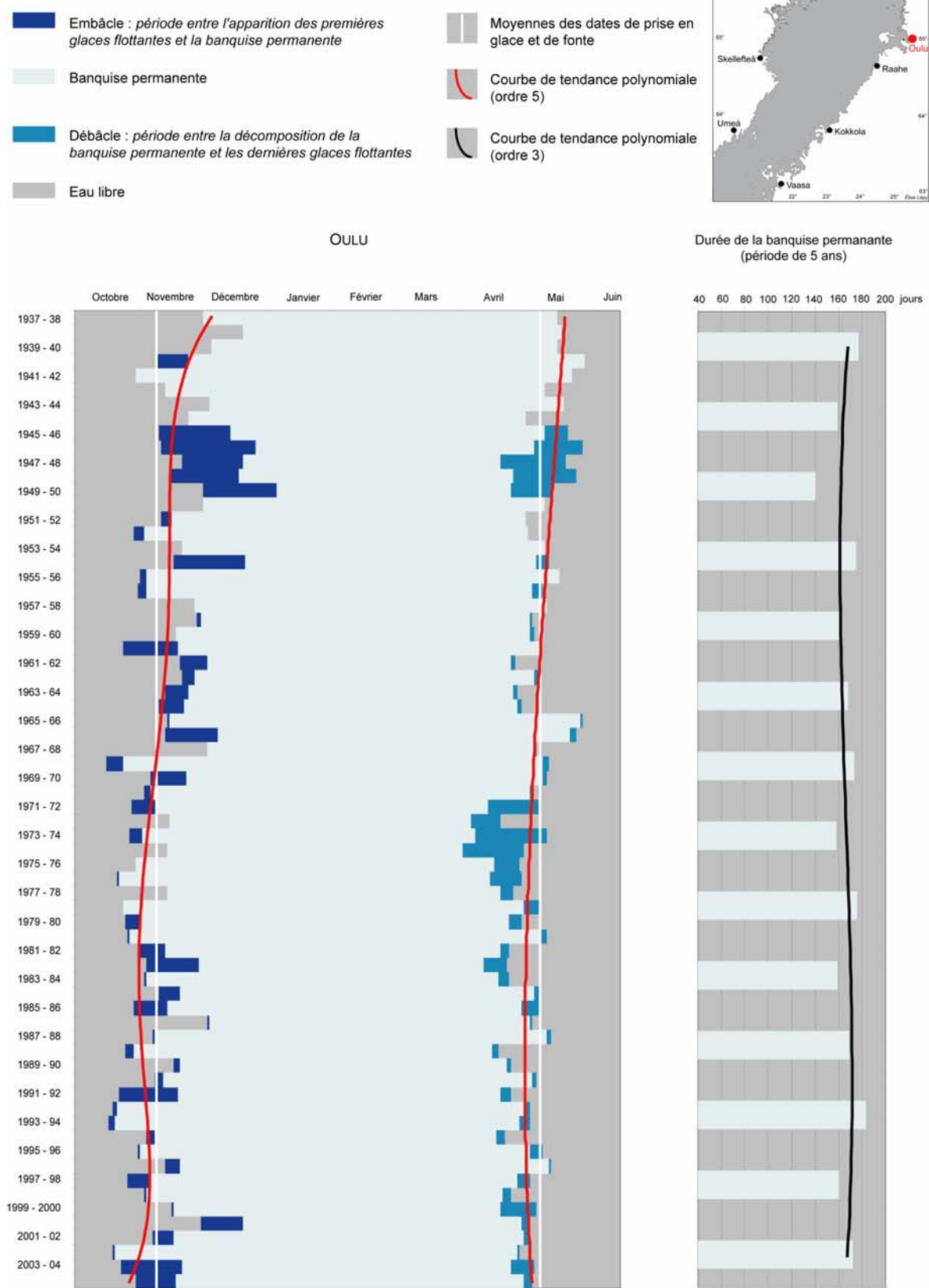
Les stations côtières qui se situent près de l'entrée de la Baie de Botnie, plus au Sud, présentent plus de fluctuations. Ainsi, les dates de prise en glace à Raahe (graphique 52) varient fortement autour de la moyenne alors les débâcles ont une légère tendance à se dérouler plus tôt que la moyenne depuis les années 1970. La durée de la banquise permanente varie d'une dizaine de jours d'une décennie à l'autre et présente un léger rallongement ces dernières années.

La station de Kokkola (graphique 53) connaît en moyenne 140 jours d'englacement. Des variations plus importantes des dates d'embâcle et de débâcle sont apparues à partir des années 1970 avec, pour ces dernières années, une prise en glace légèrement plus tardive et une fonte plus précoce.

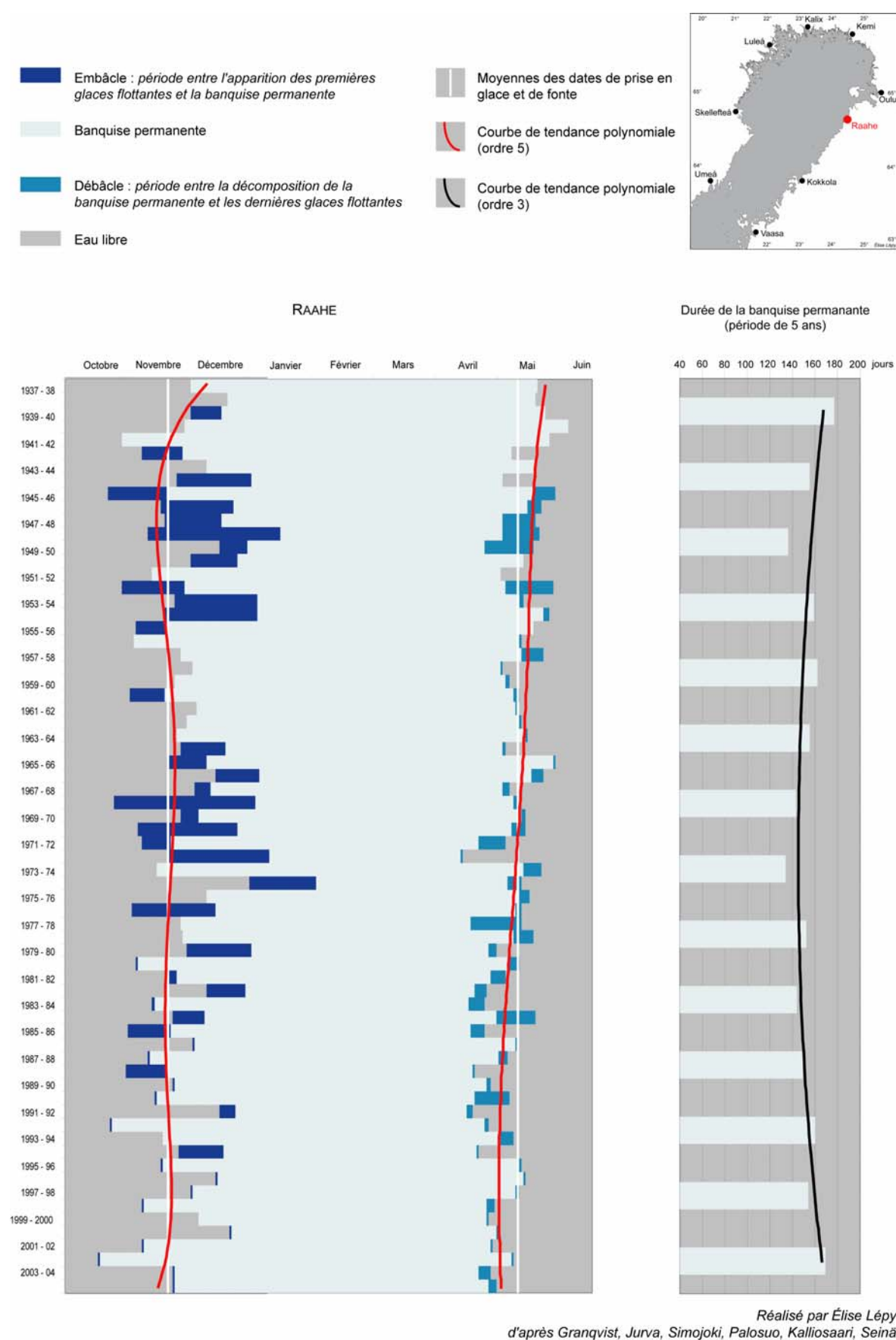
Enfin la station de Vaasa (graphique 54) présente un schéma similaire à la station précédente. La saison glacielle a diminué d'une quarantaine de jours entre les années 1930 et les années 2000 avec un creux dans les années 1970 (un peu plus de 110 jours).







Graphique 50 – Comportement des glaces de mer à Kemi de 1937 à 2005
 Graph 50 – Sea ice characteristics at Kemi from 1937 to 2005






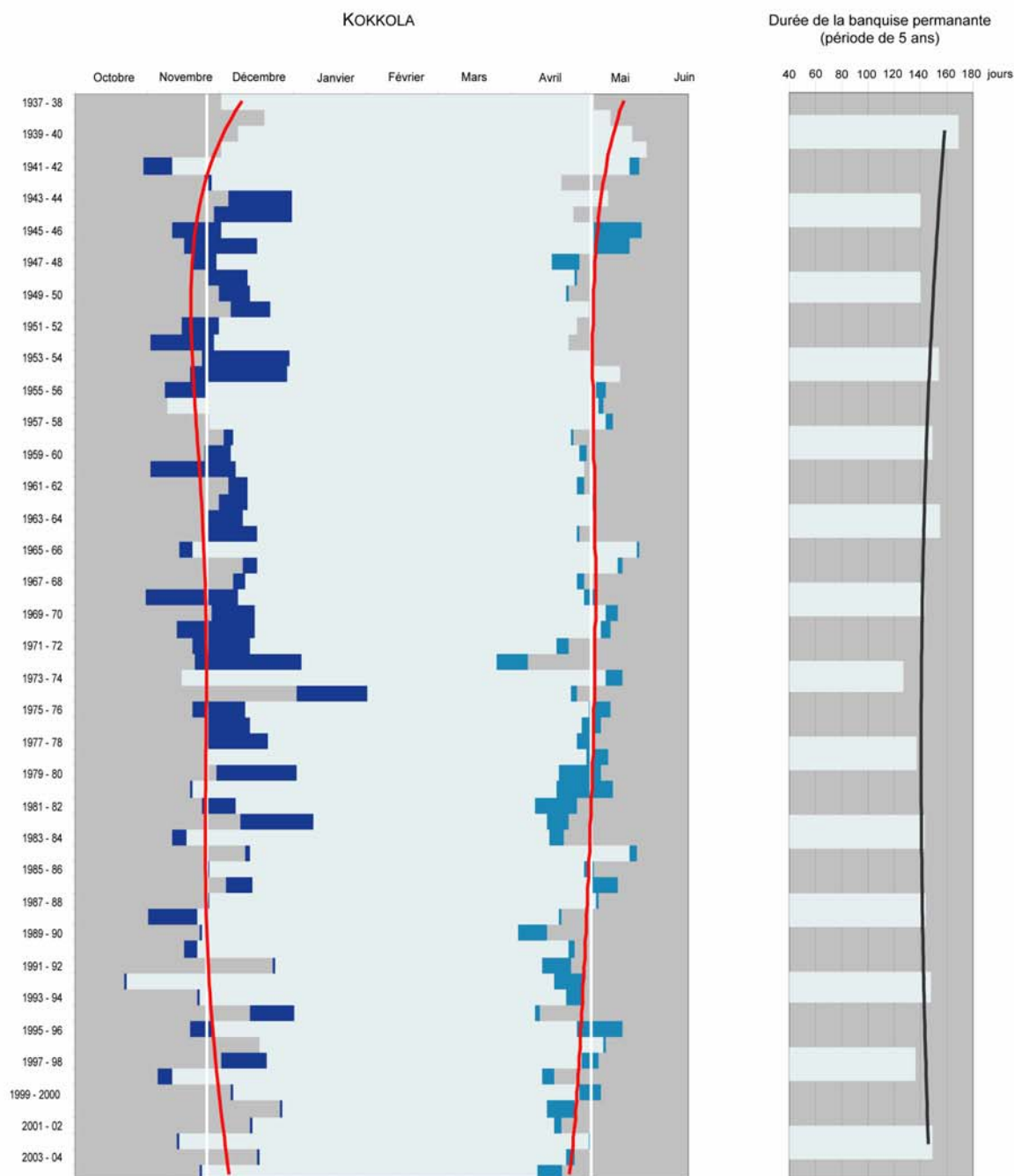
Graphique 51 – Comportement des glaces de mer à Oulu de 1937 à 2005
Graph 51 – Sea ice characteristics at Oulu from 1937 to 2005



Graphique 52 – Comportement des glaces de mer à Raashe de 1937 à 2005
 Graph 52 – Sea ice characteristics at Raashe from 1937 to 2005

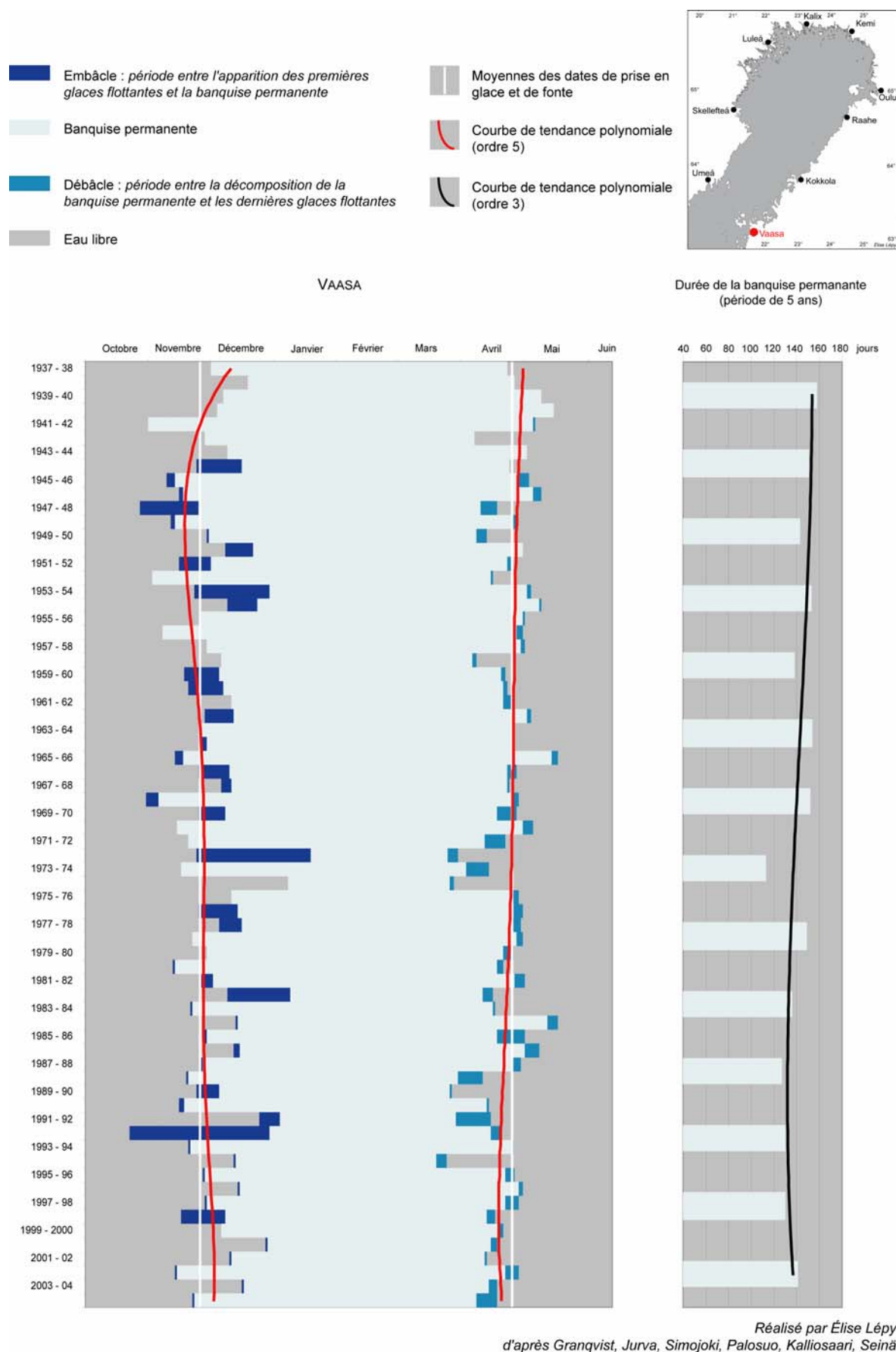
-  Embâcle : période entre l'apparition des premières glaces flottantes et la banquise permanente
-  Banquise permanente
-  Débâcle : période entre la décomposition de la banquise permanente et les dernières glaces flottantes
-  Eau libre

-  Moyennes des dates de prise en glace et de fonte
-  Courbe de tendance polynomiale (ordre 5)
-  Courbe de tendance polynomiale (ordre 3)



Réalisé par Élise Lépy
d'après Granqvist, Jurva, Simojoki, Palosuo, Kalliosaari, Seinä

Graphique 53 – Comportement des glaces de mer à Kokkola de 1937 à 2005
Graph 53 – Sea ice characteristics at Kokkola from 1937 to 2005



Graphique 54 – Comportement des glaces de mer à Vaasa de 1937 à 2005
Graph 54 – Sea ice characteristics at Vaasa from 1937 to 2005

10.2.2.3 – Les oppositions littorales en Baie de Botnie

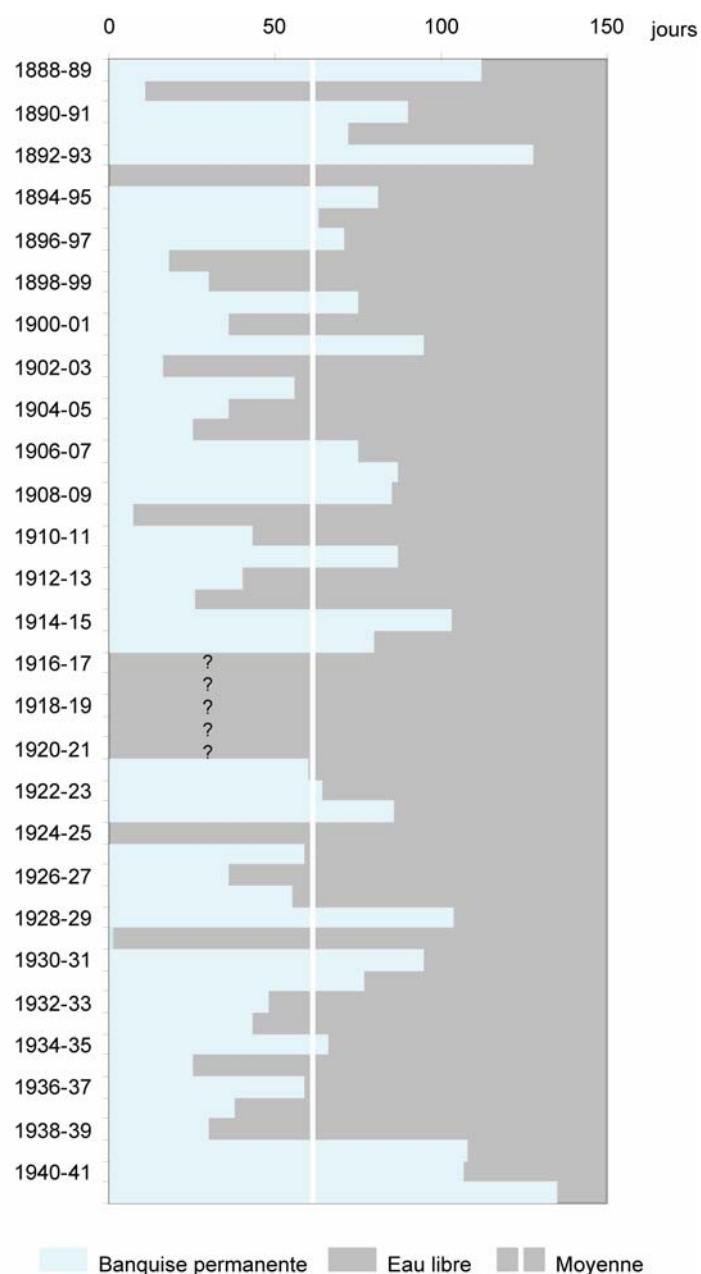
En définitive, les graphiques des côtes suédoises et finlandaises montrent, d'une part, ce à quoi on s'attendait, que la durée de la saison des glaces de mer, est plus importante dans le Nord de la Baie de Botnie que dans le Sud où les fluctuations sont plus importantes.

Mais d'autre part, les deux côtes de la baie ne présentent pas exactement les mêmes profils glaciels. Alors que l'on peut observer une tendance plus significative à la diminution de la saison glacielle (et donc à la prise en glace plus tardive et à la débâcle plus précoce) sur la côte Ouest, la stabilité des courbes de la côte Est est notable. Cependant, cet effet est clairement estompé pour les stations les plus septentrionales. Cette opposition littorale suggère l'influence plus forte d'anticyclones d'hiver qui favorisent la pérennité de la banquise à l'Est. En revanche, à l'Ouest, en dépit d'une position sous le vent, l'emprise continentale est moindre.

Mais, de manière générale, aucune grande tendance ne peut être réellement dégagée dans la Baie de Botnie depuis la fin du XIX^{ème} siècle. Malgré la variabilité relative de la saison glacielle sur la côte suédoise, on note la stabilité du comportement des glaces de mer qui évoluent dans un domaine climatologique finalement assez stable depuis plus d'un siècle.

10.2.2.4 – La côte lettone du Golfe de Riga

En ce qui concerne le Golfe de Riga, il est plus difficile de dégager une quelconque tendance étant donné la trop courte série présentée sur le graphique 55. D'autre part, il est important de préciser que les hivers 1888 à 1917 concernent de façon générale des mesures dans le Sud du Golfe alors que les hivers 1921 à 1942 regroupent les valeurs pour la station de Daugavgrivas à Riga. On peut toutefois conclure que la saison glacielle dans le Golfe de Riga est très variable puisque certains hivers ne voient aucune glace (1924-25) se former ou très peu (une journée en 1929-30), et d'autres ont une saison glacielle proche de celle du Golfe de Botnie (135 jours en 1942). Bien entendu, il est très visible que le début des années 1940 a connu de longues saisons glacielles ce qui confirme l'existence de la courte période de refroidissement mentionnée auparavant.



Réalisé par Élise Lépy
d'après Рыбонущ, 1918 et JūrmieciĀs Departamenta Hidrografiskā Nodaļa, 1942

Graphique 55 – Durée de la saison glacielle dans le fond du Golfe de Riga de 1888 à 1942
Graph 55 – Ice season length in the Southern part of the Gulf of Riga from 1888 to 1942

10.2.3 – Conclusion partielle

L'analyse des graphiques de températures et des conditions glacielles de certaines stations côtières de la Baie de Botnie et du Golfe de Riga, a permis de démontrer qu'il est difficile d'émettre des tendances communes à tout le bassin de la Baltique. En effet, depuis la fin du XIX^{ème} siècle, on note une relative stabilité du comportement des glaces de mer en Baie de Botnie. Alors que beaucoup de travaux se conforment dans leurs conclusions à la tendance scientifique actuelle, on peut, en ce qui nous concerne, s'interroger sur la pertinence du cas baltique pour raisonner sur les questions liées au réchauffement global.

Si l'on compare l'évolution des températures et des glaces marines de la Baltique avec celles d'autres mers et océans, on peut donc remarquer que chaque site évolue de façon différente. Ainsi, les recherches menées par Andrea Taurisano et *al.* (2004) confirment, à une échelle plus globale, que l'évolution climatique diffère selon le site. Ils ont étudié ainsi la variabilité climatique à Nuuk au Groënland pour laquelle ils concluent que la première moitié du XX^{ème} siècle a connu une tendance au réchauffement avant un net refroidissement durant la seconde moitié de ce siècle avec une baisse approximative de la température moyenne annuelle de l'air de 1,5°C. Ce refroidissement est intervenu alors qu'une séquence de réchauffement était observée dans le reste de l'hémisphère Nord. À propos de l'Arctique, C. Kergomard (2007, 5) a observé, dans les régions au Nord du 60° Nord, une différence de +2°C entre la première et la dernière décennie du XX^{ème} siècle qui, d'après lui, est sensiblement supérieure à toutes les autres zones climatiques du globe. En revanche, aucune tendance continue n'est observable mais seulement de nombreuses variations :

- phase de réchauffement au début des années 1910 avec un pic atteint à la fin des années 1930 et au début des années 1940. Les années 1938, 1943 et 1944 ont alors été considérées comme des années chaudes. Il est vrai, à titre de comparaison, que les conditions glacielles de la Baltique ont été extrêmement modérées pour ces trois mêmes années.
- trois décennies marquées par un refroidissement avec un pic à la fin des années 1960 et au début des années 1970
- et une nouvelle phase de réchauffement qui s'affirme depuis les années 1990.

On notera que cet auteur n'insiste absolument pas sur les hivers très froids de 1940-1942 et 1985-1987 qui ont pourtant été importants en Mer Baltique.

En définitive, il convient donc de rester prudent sur toutes les hypothèses de futurologie climatique et les incidences sociétales qui en découleraient.

10.3 - LE FUTUR DES CONDITIONS GLACIELLES DE LA MER BALTIQUE

S'appuyant sur la modélisation, des travaux scientifiques se sont penchés sur le problème du comportement futur des glaces de la Baltique. Ils s'interrogent, bien entendu, sur le rôle du changement climatique global et sur l'évolution à venir des caractères physiques et écologiques de la Mer Baltique. Certains chercheurs ont ainsi établi grâce à des modèles couplant océan – glaces de mer, des estimations sur le futur climat à l'échelle régionale sachant, comme nous l'avons mentionné dans l'un des chapitres antérieurs, que l'état de la Mer Baltique paraît être le résultat de forçage extérieur. Anders Stigebrandt et Bo Gustafsson (2003, 254) en ont ainsi conclu que le temps de réponse étant court entre la température de l'air et celle de l'eau, la couverture de glace devrait dans l'avenir réagir assez rapidement face au changement climatique général.

10.3.1 - Le changement climatique

D'après les experts du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat), la température annuelle en Europe augmenterait de 0,1°C à 0,4°C par décennie au cours du XXI^{ème} siècle selon divers scénarios et modèles (Alcamo et *al.*, 2007, 544). Certains chercheurs ont estimé qu'une augmentation moyenne de 0,45°C par décennie existerait en Finlande, en Suède et en Norvège avec une élévation des températures plus importante en hiver qu'en été (Jóhannesson et *al.*, 1995, 193 ; Räisänen, 2004 ; Omstedt et Hansson, 2006 ; HelCom, 2007a, 32 ; Christensen et *al.*, 2007, 873). De même, d'après le BACC (*BALTEX Assessment of Climate Change*) dans une étude très récente sur le futur changement climatique et les projections concernant la Mer Baltique, ce réchauffement plus important pour la saison hivernale verrait, selon le plus haut scénario, les températures augmenter de 10°C (HelCom, 2007a, 32). En ce qui concerne les précipitations, les hivers de la quasi-totalité du bassin baltique devraient être plus humides, de 25 à 75% de précipitations hivernales en plus dans le Nord, et de 20 à 70% dans le Sud (HelCom, 2007a, 33).

Par ailleurs, d'après le communiqué de presse d'HelCom (mars 2007b), les températures de l'air devraient s'élever au cours du XXI^{ème} siècle dans toutes les régions de la Baltique, les modèles régionaux y indiquant une augmentation de la température moyenne annuelle de l'air de 3 à 5°C d'ici la fin du siècle. Il semblerait alors que le réchauffement se produirait davantage en hiver dans le Nord et l'Est de la Baltique, mais en été dans le Sud. Selon l'extension des glaces, l'évolution vers un réchauffement aurait débuté dans la seconde moitié du XIX^{ème} siècle. Durant les dix dernières années toutes les saisons glacielles ont été moyennes, modérées voire extrêmement modérées (graphique

14). Les projections prévoient une augmentation de la température moyenne de surface de la Mer Baltique de 2 à 4°C selon les scénarios.

10.3.2 – La banquise

Tous les experts s'accordent donc à dire que l'extension de la banquise de la Mer Baltique diminuerait de façon dramatique (Haapala et *al.*, 2001b ; Meier et *al.*, 2004 ; Christensen et *al.*, 2007, 879, Jylhä et *al.*, 2008) de l'ordre de 35% à 55%. De plus, elle devrait être plus mince et avoir moins de neige accumulée sur sa couche supérieure.

Les travaux du BACC (*in* HelCom, 2007a) confirment d'ailleurs que le manteau neigeux et le couvert de glace devraient se retirer vers le Nord et l'Est avec un impact non négligeable sur le climat régional. Ainsi l'importante réduction de la banquise en Baie de Botnie devrait conduire à une élévation substantielle de la température de l'air au dessus du bassin (HelCom, 2007a, 28). Ainsi, une différenciation régionale devrait se dessiner et plusieurs scénarios sont proposés projetant une diminution dramatique de l'extension des glaces de mer au cours du XXI^{ème} siècle (tableau 29).

Ainsi, le modèle SILMU prévoit une couverture de glace de la Baltique réduite à 10% en 2050 puis une disparition totale de la banquise plus tard avec une augmentation des températures qui seraient plus importantes en hiver soit 0,6°C par décennie (Haapala et Leppäranta, 1997, 105).

Par ailleurs, il résulte aussi de la recherche du BACC (*in* HelCom, 2007a) que la Mer Baltique serait alors divisée en deux parties : l'une comprenant les Golfes de Botnie et de Finlande, et l'autre la Baltique Propre, le Golfe de Riga et les détroits danois. Ainsi, vers la fin du XXI^{ème} siècle, la Mer de Botnie, une large partie du Golfe de Finlande, et le Golfe de Riga seraient totalement libérés des glaces hivernales. La durée de la saison glacielle diminuerait de un à deux mois dans les régions septentrionales et de deux à trois mois dans le Sud. D'ici 2070, la température moyenne annuelle de l'eau de surface devrait augmenter de 2 à 4°C.

J. Haapala et *al.* (2001b, 244) estiment également que le nombre moyen de jours avec glace baisserait de manière significative mais inégalement selon les lieux. Ainsi, la durée de la saison glacielle à Kemi devrait se réduire de 17,6 à 18,8% alors que celle à Kotka connaîtrait une diminution supérieure de 24 à 33%⁴⁷. La durée banquise côtière de la Baie de Botnie devrait se raccourcir d'un mois mais durerait toutefois plus de quatre mois.

Selon les scénarios proposés par H. Meier et *al.* (2004, 251), la durée de la saison glacielle se réduirait aussi de manière significative. Ainsi, le premier scénario (annexe 20)

⁴⁷ Pourcentages calculés à partir des données fournies par J. Haapala et *al.*, 2001. Le tableau de valeurs figure en annexe 20.

projette une réduction de 20% pour Kemi, 43% pour Kotka, 83% pour Utö et 68% pour Kihnu. Le second dévoile des pourcentages plus importants, respectivement 25%, 59%, 92% et 84%. Il existerait donc bien une inégalité dans l'évolution des caractéristiques glacielles selon la situation géographique. Encore une fois, de façon plus globale, les chiffres divergent en fonction des lieux.

De façon plus générale, A. Omstedt et D. Hansson (2006, 250) estiment que la mer devrait être complètement recouverte de glace ou totalement libre de glace si les températures de l'air varient respectivement de -6°C et +2°C.

Scénarios		Extension de la glace (km ²)	Saison glacielle à Kemi (jours)	Épaisseur de glace (cm)	Date d'embâcle	Date de débâcle
Haapala et Leppäranta, 1997, SILMU		pas de glace	- 55 jours	35 cm (Kemi)	40 jours plus tard (Kemi)	15 jours plus tôt
Haapala et al., 2001	HIM	- 100 000 km ²	- 35 jours	27 cm		
	RCO	- 144 000 km ²	- 39 jours	43 cm		
Meier et al., 2004	B2	- 117 000 km ²	- 26 jours	29 cm	24 jours plus tard (Baie de Botnie)	26 jours plus tôt
	A2	- 145 000 km ²	- 37 jours	23 cm		

Tableau 29 – Évolution de quelques scénarios pour les glaces de la Mer Baltique
Table 29 – Scenario evolution for Baltic Sea ice

10.4 - CONCLUSION

L'accord n'est pas total sur ces prévisions d'après les plus récentes observations actuelles. Alors que des estimations antérieures prévoyaient déjà une nette réduction de la banquise hivernale, les glaces de mer de la Baltique se forment toujours tous les hivers dans la Baie de Botnie et dans les parties orientales du Golfe de Finlande et d'après J. Haapala et M. Leppäranta (1997, 106), la banquise devrait toujours apparaître à Kemi en 2100.

En définitive, les prévisions futures des conditions glacielles de la Mer Baltique sont à pondérer d'autant plus que l'analyse régionale de la Baie de Botnie a montré une certaine stabilité générale du comportement de ces glaces depuis un siècle. Par conséquent, il est important de nuancer ces généralisations d'échelle globale dans le cadre d'une approche scalaire plus fine d'échelle macro-régionale à régionale.

Néanmoins, une variabilité naturelle des phénomènes cryomarins a toujours existé entraînant de nombreuses variations du comportement des glaces de mer. Les variations glacielles ont toujours eu, bien entendu, des conséquences inévitables sur l'environnement marin et anthropique de la Baltique. Les activités hivernales professionnelles et de loisir en sont évidemment affectées.

Les impacts socio-économiques des variations glacielles

Face à l'hypothèse possible d'une réduction plus ou moins rapide de la banquise, il faut désormais s'interroger sur le devenir socio-économique des populations riveraines sachant qu'elles ont depuis longtemps développé des stratégies fines d'adaptation à la variabilité historique du contraste saisonnier de leur espace marin.

11.1 – LES TRANSFORMATIONS PROBABLES DES ACTIVITES TRADITIONNELLES

On a déjà vu que la chasse aux phoques et la pêche sur glace sont des activités traditionnelles anciennes en Mer Baltique qui avaient lieu alors plus ou moins précocement ou plus ou moins tardivement d'un hiver à l'autre, en fonction des conditions des glaces de mer. De nos jours, elles sont toujours concernées par la variabilité glacielle annuelle, de manière différente toutefois puisqu'il faut prendre en compte l'évolution des techniques et du matériel. Par exemple, le déplacement en motoneige sur la banquise pour se rendre sur le lieu de pêche, a été une innovation récente dans le monde de la pêche.

On peut aussi se demander, au travers des témoignages de Jouni Heinikoski (chasseur) et de Kari Karp (pêcheur), comment est perçue, à ce niveau, la question du réchauffement climatique et des inévitables modifications induites pour leurs activités.

Tous deux évoquent des conditions météorologiques extrêmes (tempêtes, changements rapides des températures...) beaucoup plus fréquentes ces dernières années. D'après eux, alors que les variations climatiques interannuelles étaient de plus faible ampleur dans les années 1970 et 1980, ces deux décennies ont compté des hivers très froids. De nos jours, ils soulignent des épisodes plus venteux et des perturbations liées aux basses pressions de plus en plus fréquentes dont le trajet migre vers le Nord de la Baltique.

11.1.1 – Les modifications pour la pêche « blanche »

Des années 1970 et 1980, K. Karp se souvient que la pêche sur glace commençait avant Noël et se terminait à la fin du mois d'avril voire la première semaine de mai. Mais

depuis quelques années, il a observé que le moment où la couche de glace est suffisamment épaisse et compacte pour supporter des déplacements en automobile ou en motoneige est plus tardif. Dorénavant, la pose des filets de pêche se déroule plus tard et leur retrait plus précocement. Dans le futur, un réchauffement des températures entraînerait, selon lui, des risques pour se déplacer sur la banquise beaucoup plus nombreux et graves du fait du ramollissement des couches de glace. D'autre part, la ligne délimitant la banquise à l'eau libre de glace, serait aussi plus proche du rivage, modifiant le comportement des poissons et affectant en conséquence les produits de la pêche.

11.1.2 – Les modifications pour la chasse aux phoques

On sait que la banquise est un élément essentiel de l'environnement des phoques puisqu'elle permet aux femelles de mettre bas et d'élever leurs progénitures. Pour ces animaux, l'un des paramètres vitaux le plus important est ainsi la durée de la saison glacielle. Or d'après les scénarios du GIEC, cette dernière pourrait se réduire à quelques dizaines de jours seulement dans la Mer d'Archipel là où l'on dénombre actuellement les plus grandes populations de phoques (HelCom, 2007a, 43). En revanche, dans les régions septentrionales de la Baie de Botnie, les scénarios prévoient toujours près de quatre mois de glaces de mer, donc plus que la durée actuelle de la saison glacielle à l'entrée du Golfe de Botnie. Une telle évolution aurait donc comme conséquence une importante modification de la distribution géographique des phoques.

En particulier, les lieux d'habitat du phoque annelé risqueraient de diminuer en surface et de se déplacer ainsi dans les régions les plus septentrionales de la Mer Baltique (Meier et *al.* 2004, 254), disparaissant de la Mer d'Archipel et des Golfes de Finlande et de Riga. Les phoques gris, en revanche, ne devraient pas subir de tels changements puisqu'ils vivent aussi bien sur les glaces de mer que sur les rochers. De ce fait, leur lieu d'habitat se déplacerait de la banquise vers les rochers (HelCom, 2007a, 43).

Bien entendu, les migrations des phoques auraient des incidences inévitables sur la chasse. Le chasseur J. Heinikoski pense ainsi que les techniques traditionnelles de chasse seront perdues si la banquise est amenée à disparaître, sachant que la chasse aux phoques continuera d'une autre manière. À ce titre, les techniques de chasse sont suffisamment flexibles pour que les chasseurs de phoques s'adaptent au nouvel environnement.

Cependant, globalement, la chasse aux phoques s'en trouverait affectée comme on l'observe déjà au Canada où la disparition rapide de la glace après la débâcle et l'absence de glaces flottantes réduisent la chasse au morse et au phoque, base traditionnelle de l'alimentation des populations locales (Ford et *al.*, 2009).

Il semblerait donc qu'en Mer Baltique ces deux activités traditionnelles devraient perdurer dans l'avenir sachant que les techniques, les méthodes et le matériel de chasse et de pêche devront profondément s'adapter aux changements.

11.2 – L'ÉVOLUTION DE LA NAVIGATION MARITIME

On a déjà vu dans le chapitre 8 que la navigation maritime en Mer Baltique, activité fondamentale de l'économie des régions riveraines, est très sensible et très adaptée aux conditions glacielles qui imposent l'assistance des brise-glaces d'une part, et induisent une augmentation des incidents et accidents d'autre part. Il faut rappeler que la navigation hivernale dans le fond des golfes de Botnie et de Finlande est assez récente puisqu'au début de la navigation maritime, cette activité n'était que saisonnière et qu'elle ne se produisait que dans les eaux libres de glace. Le développement de la banquise hivernale engendrait tout simplement l'arrêt total de l'activité. Mais, depuis plus d'un siècle, l'évolution des matériaux et techniques de navigation a permis une pratique annuelle constante de la navigation maritime.

11.2.1 – L'historique de la navigation hivernale

Dans ce développement, on abordera davantage le cas de la Finlande, les propos sur la Lettonie étant plus succincts du fait d'une information plus lacunaire.

11.2.1.1 – Les débuts de la navigation hivernale dans la Baltique

La navigation hivernale fut au cœur de nombreuses règles édictées principalement pour assurer la sécurité maritime. Au temps de la Hanse, le trafic sur mer était interrompu en hiver, les ports étant souvent pris par les glaces. Cette règle étant rendue obligatoire au XIV^{ème} siècle, l'accès aux ports hanséatiques fut interdit du 11 novembre au 22 février, cette période de restrictions étant plus courte pour certains navires transportant des denrées en provenance et à destination de la Scanie. Malgré le mécontentement de certaines villes hanséatiques, le trafic maritime dans la Baltique fut donc pratiquement interrompu pendant l'hiver (Dollinger, 1988, 182).

Au temps des bateaux à voile dominant encore le trafic maritime au XIX^{ème} siècle, la navigation hivernale était toujours inexistante. Ce n'est qu'au début du XX^{ème} siècle que les navires commencèrent à naviguer dans les eaux faiblement englacées de la Baltique. Or la construction progressive de la motorisation à vapeur à la fin du XIX^{ème} siècle n'occasionna pas dans un premier temps de changements majeurs dans le trafic

hivernal. En effet, la coque des navires était encore souvent fabriquée en bois comme celle des anciens bateaux à voile et était par conséquent toujours fragile.

Cependant, les premières liaisons hivernales entre la Finlande et la Suède furent assurées dès l'hiver 1878 par le prédécesseur du brise-glace, *l'Express*, qui transporta des passagers entre Hanko et Stockholm (FIMR, 1997). En 1890, la Finlande acquit son premier brise-glace, le *Murtaja* (« brise » en finnois). Ce bateau à vapeur construit par une compagnie suédoise servait surtout à assurer les exportations vers l'Europe de l'Ouest. Il fut surtout opérationnel pour le trafic maritime après la Première Guerre Mondiale (où il connut de multiples problèmes techniques).

Dans la première moitié du XX^{ème} siècle, le commerce maritime et les flottes marchandes de la Baltique subirent comme ailleurs les conséquences désastreuses de la Première Guerre Mondiale. L'après-guerre connut ainsi une croissance ralentie du commerce maritime et la reconstruction de la flotte marchande finlandaise fut assez lente. Compte-tenu de l'incapacité économique de la construction navale, les importations finlandaises dépendaient de quelques bateaux à vapeur (au nombre de 511 en 1918) et plus encore de bateaux à voile (près de 640, la même année) toujours dominants en Mer Baltique (Kaukiainen, 1993, 130).

11.2.1.2 – De l'entre-deux-guerres à la fin des années 1960 : le renforcement des navires et les premières réglementations

Au milieu des années 1920 seulement, le commerce maritime reprit progressivement et les Finlandais achetèrent plus de 20 000 tonnes nettes de bateaux à vapeur (*ibid.*, 135). De 1918 à 1922, plus de 600 navires finlandais furent ainsi construits dont la plupart étaient soit des petits bateaux à vapeur à coque en bois transportant principalement du bois, soit des bateaux à voile à moteur auxiliaire. Dans les années 1920, les navires traditionnels en bois dominaient encore dans la construction navale. De plus, de grands voiliers à coque en acier (*windjammers*) furent achetés pour combler les pertes de la guerre. Dans les années 1930, la croissance suivit son cours et les Finlandais commencèrent à investir davantage dans les bateaux à vapeur d'occasion. De 1931 à 1934, 114 bateaux à vapeur et à moteur diesel furent achetés et une demi douzaine de voiliers. Après 1935, l'industrie de construction navale se développa davantage et construisit sept bateaux à moteur diesel. La marine marchande finlandaise connut donc un changement structurel notable entre les deux guerres avec un déclin continu des navires à voile (tableau 30). Les navires à vapeur et à moteur diesel étaient majoritairement composés d'une coque en bois et naviguaient principalement le long des côtes.

	Bateaux à vapeur et à moteur diésel		Bateaux à voile	
	Nombre	Tonnage net (x 1000)	Nombre	Tonnage net (x 1000)
1920	467	74,5	609	88,5
1925	319	88,9	431	76,9
1930	414	151,6	285	62,6
1935	503	253,9	167	51,4
1939	539	338,9	64	29,5

Source : Finnish official statistics in Kaukiainen, 1993

Tableau 30 – Le développement de la marine marchande finlandaise de 1920 à 1939

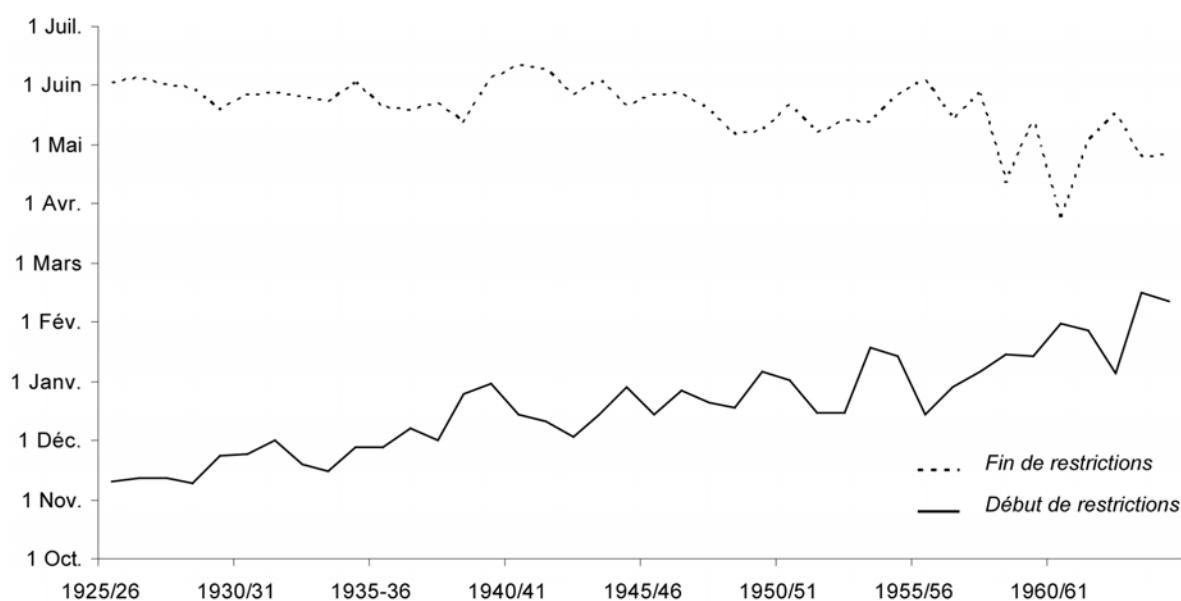
Table 30 – The development of the finnish merchant fleet from 1920 to 1939

Par ailleurs, durant la même période, la navigation hivernale s'étendit aux régions méridionales de la Baltique et au Golfe de Finlande. Effectivement, durant les hivers moyennement froids des années 1920 et 1930, il y eut des tentatives de laisser les ports de la Mer de Botnie et du Golfe de Finlande ouverts. Bien entendu, l'augmentation des constructions de navires à coque en fer ou en acier joua un rôle important dans la transition vers la navigation hivernale en Mer Baltique. De plus, la flotte de brise-glaces s'étoffait de trois nouveaux navires et les bateaux furent renforcés dans leurs structures pour affronter les glaces alors que les premières réglementations du trafic hivernal se mettaient en place. Cependant, la consommation de charbon des brise-glaces à vapeur était trop importante et cela eut pour conséquence la restriction de leur champ d'opération. Les ports d'Hanko et de Turku (Golfe de Finlande) furent ainsi les seuls à rester ouverts tout l'hiver. En 1939 toutefois, la mise en fonction du brise-glace à propulsion diésel-électrique *Sisu* permit au trafic hivernal de s'élargir (FIMR, 1997). En définitive, la part du trafic hivernal dans le transport maritime annuel passa de 7 à 15 % entre les deux guerres (*ibid.*, 144).

Malgré les avancées techniques considérables sur les matériaux de construction des navires et le fonctionnement de nouveaux brise-glaces, le fort englacement hivernal des eaux septentrionales du Golfe de Botnie ne permit cependant pas l'accès aisé aux ports les plus éloignés. Le trafic hivernal y était donc quasi inexistant.

Dans les années 1920, il pouvait se passer ainsi plus de 200 jours sans qu'aucun navire n'atteigne le port d'Oulu. Le graphique 56 montre la date à laquelle le dernier navire s'est présenté chaque année au port d'Oulu et celle du premier navire arrivé au printemps entre 1925 et 1965. Jusqu'en 1950, ces navires étaient principalement des bateaux à vapeur qui naviguaient certes plus facilement dans les glaces de mer que les bateaux à voile, sachant que ces derniers dominaient toutefois au début de ce siècle le trafic maritime. Néanmoins, on constate que, de façon générale, la période sans navigation hivernale tend à diminuer. En effet, le nombre de jours pendant lesquels aucun navire ne s'est présenté au port d'Oulu est passé de 203 jours pendant l'hiver 1926-27 à

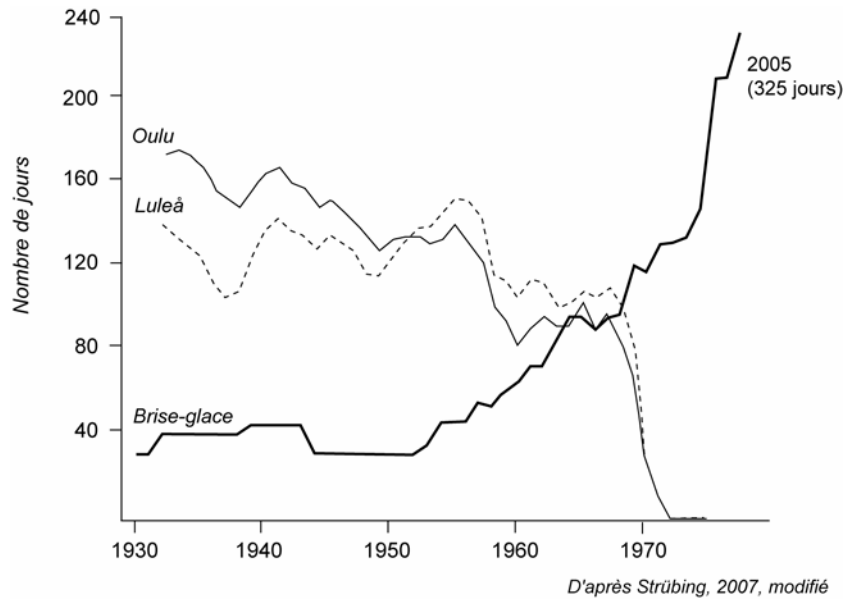
seulement 53 jours en 1960-61. Or la sévérité des conditions glacielles n'explique pas à elle seule cette tendance : en effet, le coefficient de corrélation entre le nombre de jours sans navigation et l'extension maximale de la glace en Mer Baltique reste faible ($r = 0,23$). Mais l'évolution de la structure de construction des navires et l'augmentation du nombre de brise-glaces ont effectivement joué un rôle important. Ainsi, après la Seconde Guerre Mondiale, évidemment catastrophique pour la flotte finlandaise, aucun bateau à voile ne fut plus construit et comme pour les diverses flottes maritimes, il y eut un déclin des bateaux à vapeur au profit des navires à moteur diesel. Ainsi, la flotte finlandaise comptait en 1945 encore 312 navires à vapeur et 37 navires à moteur diesel, alors qu'en 1970, elle en dénombrait respectivement 53 et 447.



Réalisé par Élise Lépy
d'après les données du Finnish Institute of Marine Research

Graphique 56 – Dates du dernier navire arrivé et du premier parti du port d'Oulu entre 1925/26 et 1964/65
Graph 56 – Dates of the last ship arrival and the first ship departure at the port of Oulu between 1925/26 and 1964/65

D'autre part, la flotte de brise-glaces désormais commune aux autorités maritimes suédoises et finlandaises ne cessa d'augmenter passant de 7 à 9 navires à la fin des années 1940 à 12 au milieu des années 1960 (Strübing, 2007, 69) ce qui eut un impact significatif sur le raccourcissement de la période de fermeture des ports de la Baie de Botnie (graphique 57). Effectivement, la flotte finlandaise des brise-glaces se reconstruisit dans les années 1950 avec des navires tels que *Voima* en 1954, *Karhu* en 1958 et *Sampo* en 1960. Un à un, les ports hivernaux devinrent accessibles et dans les années 1970, la plupart des ports restèrent ouverts toute l'année. (FIMR, 1997).



Graphique 57 – La fermeture des ports de Luleå et d’Oulu de 1930 à 1977 et la durée du fonctionnement du brise-glace
 Graph 57 – The closure of Luleå and Oulu ports from 1930 to 1977 and icebreaking length

11.2.2 – La navigation désormais possible dans les glaces de mer depuis 1970

L’approche commune de la question de la navigation hivernale en Mer Baltique commença à émerger entre la Finlande et la Suède au milieu des années 1960 quand se fit sentir la volonté politique et économique de laisser ouvert toute l’année les ports de la Baltique Nord (Juva et Riska, 2002, 8). Cette approche avait pour ambition, d’une part, de réguler les flux d’exportation et d’importation et, d’autre part, de préserver la sécurité du trafic. Ces deux objectifs ne pouvaient évidemment être atteints sans l’assistance de brise-glaces quand les conditions glacielles le requéraient. Ainsi, depuis 1963, deux générations de brise-glaces plus puissants furent introduites à la flotte : *Tarmo* en 1963, *Varma* en 1968 (vendu plus tard à la Lettonie), *Apu* en 1970, *Urho* en 1975 et son sister-ship *Sisu* en 1976 puis, plus tard, *Otso* en 1986, *Kontio* en 1987, *Fennica* en 1993 et *Nordica* en 1994. Dès lors, le bon fonctionnement de la coopération finno-suédoise permit aux ports les plus septentrionaux (Kemi, Oulu, Raahe) de rester ouverts toute l’année. Le dernier hiver ayant connu la fermeture saisonnière des principaux ports du Golfe de Botnie fut l’hiver 1969/1970. En fait, depuis le début des années 1970, les conditions glacielles n’ont jamais causé la fermeture temporaire de ces ports. En conséquence, le trafic hivernal a augmenté dès lors d’environ 40% (Kaukiainen, 1993, 169), estompant les variations saisonnières du trafic maritime. D’autre part, de plus en plus de navires marchands ont été capables de naviguer dans des conditions glacielles plus ou moins favorables sans l’aide de brise-glaces (Landtman, 1983, 4).

Ainsi, le port d'Oulu resta fermé trois mois de l'année jusqu'à la fin des années 1960. Puis il demeura ouvert dès l'hiver 1970. En 1971, il fit acquisition du brise-glace *Tuura* construit en Suède. Aussi, dans les années 1970, le trafic hivernal s'accrut progressivement : en 1971, le trafic des mois de février et mars était 4,3 fois moins important que celui des mois de juillet et d'août et quelques années après seulement 2,5 fois moins important. De nos jours, les variations saisonnières se sont bien estompées. De janvier à mars 2008, le commerce maritime extérieur du port d'Oulu représentait 25,87%, soit un peu plus d'un quart du trafic annuel (486 100 tonnes accumulées les trois premiers mois de l'année sur 1 879 200 tonnes) (Terho, 1979).

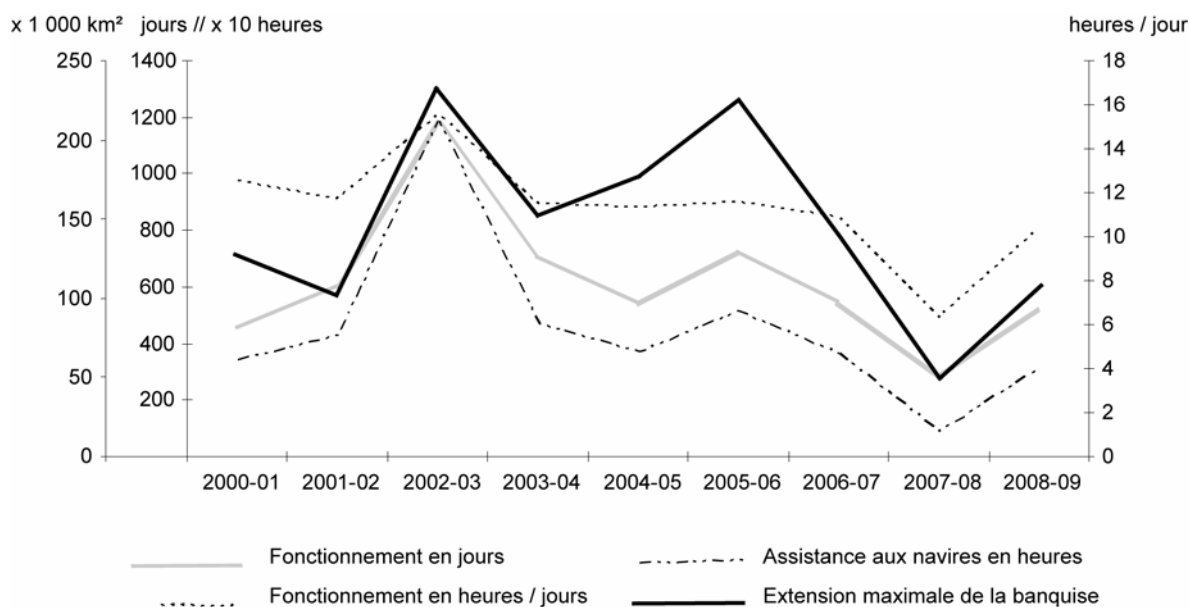
À la fin des années 1970, le tonnage transporté par les navires finlandais se situait parmi les plus élevés du monde. Dans ces années, le trafic maritime en Mer Baltique ne cessa d'augmenter. Le trafic de passagers notamment entre la Finlande et la Suède, participa considérablement à cette augmentation ainsi que le trafic hivernal qui s'est développé grâce à l'intérêt des autorités maritimes et des constructeurs au renforcement des coques des navires pour affronter les glaces de mer. De plus, les exigences pour la construction des brise-glaces ont évolué en fonction du développement du trafic maritime. De nos jours, il y a plus de 10 000 escales dans les ports de la Baltique pour chaque saison glacielle et la flotte des brise-glaces des deux pays comptait 19 navires en 2005 (Strübing, 2007, 69).

11.2.3 - Et si la banquise se réduisait ...

La plupart des scénarios climato-maritimes évoqués dans le chapitre précédent, prévoient donc une augmentation des températures qui influencerait sur les caractéristiques glacielles de la banquise de la Mer Baltique. Ainsi, une tendance à la réduction de la banquise aurait, bien entendu, des conséquences considérables sur la navigation maritime et tout le système trafic hivernal / aide à la navigation en serait affecté.

L'activité des brise-glaces, principal aide au trafic hivernal, permet déjà d'apprécier, d'une certaine manière, l'influence actuelle des variations glacielles sur la navigation maritime. Ainsi, le graphique 58 fournit des informations sur la durée de fonctionnement de la flotte finlandaise de déglacage en Mer Baltique des hivers 2001 à 2009. L'extension maximale de la banquise y est aussi indiquée. Il est évident sur ce document que les courbes des durées de déglacage se conforment à celle de l'extension maximale de la banquise. Ainsi, pendant l'hiver 2002/03, de niveau moyen mais toutefois le plus sévère de la décennie, les brise-glaces ont fonctionné en tout près de 1200 jours. Au contraire, pendant l'hiver 2007/08 à très faible extension de la banquise, le nombre de jours cumulés de fonctionnement des brise-glaces a été inférieur à 300 jours. De même,

l'assistance des brise-glaces a été maximale en 2002/03 et très faible en 2007/08. Le détail des durées de fonctionnement des brise-glace par année figure en annexe 21.



Réalisé par Élise Lépy
d'après les données du Finnish Maritime Administration / Winter Navigation department

Graphique 58 – Fonctionnement de la flotte de brise-glaces finlandaise dans les eaux de la Baltique des hivers 2000-2001 à 2008-2009 et extension maximale de la banquise

Graph 58 – Finnish icebreaker fleet work in the Baltic Sea from winters 2000-2001 to 2008-2009 and maximum ice extent

Qu'en sera-t-il désormais de l'évolution des activités des brise-glaces dans l'avenir ? Divers points nous éclairent.

Ainsi, le capitaine Ilmari Aro du FMA voit de façon positive le raccourcissement possible de la saison glacielle car elle induirait inévitablement une réduction des coûts de déglacage. Effectivement, le coût moyen de fonctionnement de la flotte finlandaise des brise-glaces est d'environ 20 millions d'euros que paie⁴⁸ le FMA. Pour un hiver qualifié de moyen équivalent à 650 jours de fonctionnement de brise-glaces, il faut ajouter 5 millions d'euros pour les différentes opérations d'assistance et portuaires, et 5 autres millions d'euros pour le carburant. Lors d'un hiver plus sévère (plus de 900 jours d'activité de déglacage), les coûts augmentent évidemment de façon spectaculaire.

D'autre part, les retards dans le trafic hivernal et les opérations portuaires (évitement et accostage...) s'estomperaient. Des modifications des restrictions au trafic hivernal seraient également apportées, car les navires de classes basses (IC et II) seraient autorisés à naviguer en hiver. Enfin, une réduction de la banquise conduirait nécessairement à l'allongement de la saison navigable en eau libre et la vitesse des navires augmenterait alors avec la diminution du couvert de glace (Kubat et al., 2007, 245).

⁴⁸ Cependant, le FMA fait payer une taxe à tous les navires accostant dans un port finlandais pour l'entretien des chenaux de navigation l'hiver.

Cependant, le risque d'accidents ou d'incidents pourrait toutefois se maintenir voire augmenter dans le Nord de la Mer Baltique du fait de la croissance du trafic.

Cependant, l'occurrence d'un éventuel réchauffement climatique laisse aussi quelques questions en suspens. Le capitaine Aro précise dans un communiqué de presse daté de septembre 2008 que des problèmes se posent actuellement quant à l'avenir même de la flotte des brise-glaces. Effectivement, un certain nombre de brise-glaces sont anciens et arrivent en fin de vie. La question se pose donc de leur renouvellement sachant que cette décennie a connu des hivers assez modérés à l'exception de l'hiver 2003. Mais un non-renouvellement de la flotte pourrait laisser une multitude de navires immobilisés dans les glaces de mer lors d'éventuels hivers plus sévères, engendrant des risques potentiels. Les nouveaux brise-glaces devraient donc être multifonctionnels et le coût de déglacage en augmenterait alors considérablement. En fait, les membres du BIM (*Baltic Icebreaking Management*) devraient envisager une solution collective pour les états qui résiderait éventuellement dans la création d'une flotte commune pour toute la Mer Baltique.

En toute hypothèse et pour conclure sur cet aspect, ces différents points iraient dans le sens d'une possible croissance du trafic maritime ayant des conséquences sur l'espace économique baltique.

11.3 – VERS UN NOUVEL ESPACE ECONOMIQUE ?

D'après ce qu'on vient de voir, la fonte relative de la banquise de la Mer Baltique profiterait à la croissance du trafic maritime et participerait à l'augmentation des échanges commerciaux entre pays riverains et aux échanges extérieurs à la Baltique. Cette nouvelle donne au niveau des flux commerciaux conforterait l'image de carrefour maritime déjà développé à propos de cet espace maritime. Elle participerait également au développement régional mis en place dans le cadre de la « Dimension Septentrionale » proposé en 1997 aux autres états baltiques par la Finlande.

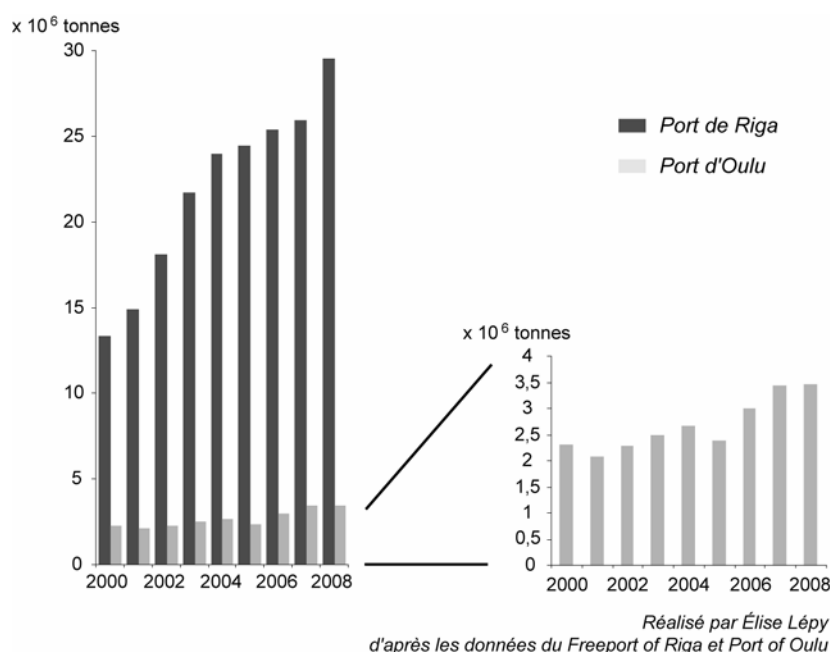
Toutefois, avant d'aborder ces perspectives, il faut auparavant souligner la diversité de l'économie maritime et portuaire de cet espace au travers des exemples significatifs des ports d'Oulu et Riga. Il faut rappeler aussi que la Mer Baltique, avant d'être un espace de collaboration maritime et économique dans le cadre de l'Union européenne a été toutefois un espace de confrontation où les intérêts nationaux des pays riverains pouvaient s'opposer, autant qu'un carrefour géostratégique essentiel au contact du monde occidental et du monde soviétique. Bien entendu, la disparition de l'Empire soviétique, l'indépendance des pays baltes et leur intégration dans l'Union européenne sont venues modifier ce contact, sans toutefois totalement l'estomper, car les survivances culturelles de l'ancien empire soviétique sont tenaces dans les pays baltes (par exemple en Lettonie, d'après notre propre expérience de recherche).

11.3.1 – Les ports d’Oulu et de Riga : analyse comparée de l’économie portuaire

L’activité maritime et portuaire de la Baltique est très diversifiée et, à ce titre, les ports d’Oulu et de Riga en sont des exemples significatifs. Leur capacité et leur trafic sont représentatifs de ports faisant face à des contraintes géographiques et problèmes économiques différents. Le port d’Oulu est situé au fond d’un golfe englacé pendant plusieurs mois de l’année, alors que celui de Riga, ancien port de l’URSS, dominait la façade orientale de la Baltique et faisait transiter les marchandises conteneurisées en provenance et à destination de l’Europe (Thorez, 1998, 42). Depuis son indépendance, la Lettonie, tout comme les autres États baltes, a su bénéficier des flux à destination et en provenance de la Russie (Thorez, 1998) et des pays de la CEI (Thorez, *à paraître*).

Il est vrai que depuis plus d’une décennie, les trafics maritimes des ports d’Oulu et de Riga ont augmenté de façon régulière. À notre sens, cette croissance repose sur deux éléments distincts. En effet, l’amélioration des conditions de la navigation hivernale et l’évolution de la situation géopolitique de l’espace baltique ont contribué au dynamisme croissant de l’économie portuaire de la Baltique.

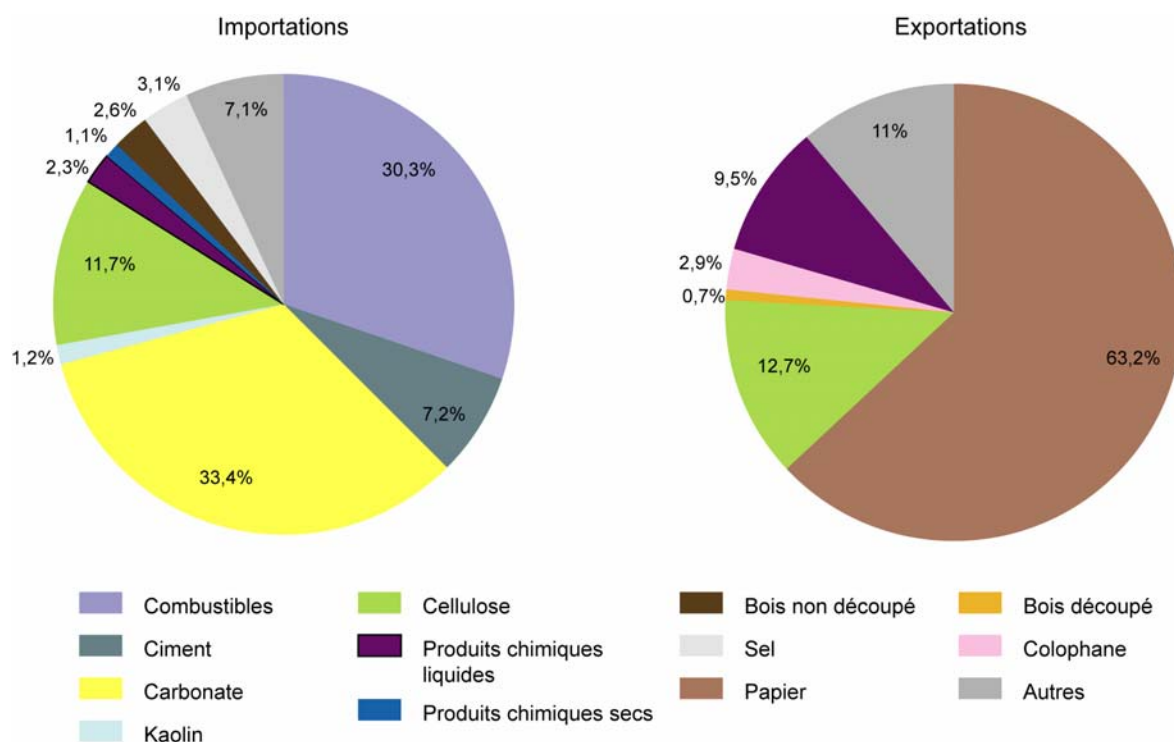
Ainsi, en 1996, le port de Riga détenait 8% du trafic des ports ex-soviétiques de la Mer Baltique avec 7,4 millions de tonnes (Thorez, 1998, 42). Mais entre 2000 et 2008, il a affiché une croissance de 221% (graphique 59). À titre de comparaison, le port d’Oulu a connu une croissance de 150% pour la même période. Dans cette comparaison, il est possible de mesurer toute la primauté du port de Riga qui a vu transiter plus de 29 millions de tonnes de marchandises en 2008 alors qu’Oulu n’en a vu que près de 3,5 millions. Mais, l’histoire, les conditions maritimes, les spécificités portuaires font d’Oulu et Riga des ports à vocation différente.



Graphiques 59 – Marchandises en tonnes aux ports de Riga et d’Oulu
Graphs 59 – Merchandise in tons at Riga and Oulu ports

11.3.1.1 – Le Port d'Oulu

Le port d'Oulu est l'un des principaux ports de la Baie de Botnie coopérant avec l'industrie forestière. Il est constitué de quatre antennes Oritkari, Nuottasaari, Vihreäsaari et Toppila (annexe 22) qui reçoivent entre 500 et 600 navires chaque année. Le trafic de marchandises excède tous les ans les trois millions de tonnes. Entre 2004 et 2008, l'import représentait environ 61% du trafic total et l'export 39%. Les deux catégories de marchandises importées sont principalement des combustibles et des matières premières utilisées par l'industrie forestière. Les exportations concernent majoritairement le papier dont la part est supérieure à 63% sur la période 2004-2008 (figure 25).



Réalisé par Élise Lépy
d'après les données de Port of Oulu

Figure 25 – Les importations et exportations au port d'Oulu pour la période 2004 – 2008

Figure 25 – Import and export at the port of Oulu for the period 2004 - 2008

Au XIV^{ème} siècle, l'embouchure de la rivière Oulujoki était déjà un petit port animé. Considérée comme la plus importante place de commerce d'Ostrobotnie avec une croissance régulière, la ville d'Oulu fut créée en 1605. Elle reçut le droit d'établir son commerce extérieur en 1755. À la fin du XIX^{ème} siècle, la flotte marchande d'Oulu était la plus importante de Finlande. Le port de Toppila établi en 1724, participa grandement à cette période prolifique du commerce du goudron qui déclina ensuite au début du XX^{ème} siècle. En 1953, le port de Nuottasaari fut construit et se spécialisa dans l'exportation de la pâte à papier. Le port de Vihreäsaari achevé en 1963 s'est consacré à l'importation de

combustibles et accueille le brise-glace Tuura que la ville a acquis en 1971 pour assurer la navigation hivernale. Enfin, le dernier port Oritkari édifié en 1970 exporte les produits de l'industrie forestière et le papier (photographie 37).

À l'heure actuelle, le port d'Oulu ne participe seulement qu'à 3% de l'activité maritime nationale. Il faut dire que la Finlande détient près de 24 ports maritimes actifs toute l'année et que les plus importants trafics se font au Sud, sur le Golfe de Finlande. Cependant il est intéressant car illustratif de la mise en valeur portuaire et maritime du fond du Golfe de Botnie, l'un des secteurs toujours les plus englacés de la Baltique.



Photographie 37 - Terminal du port d'Oritkari - Port d'Oulu - 19 avril 2006
 Picture 37 - Oritkari terminal - Port of Oulu - April 19th 2006

11.3.1.2 - Le Port de Riga

D'une toute autre envergure, le port de Riga domine l'activité maritime de son golfe en dépit des autres ports de taille moins imposante. Sa capacité de 25 millions de tonnes par an (Serry, 2005, 41) résulte de l'accueil de près de 4000 navires par an et fait de lui le deuxième port de la Lettonie après Ventspils. Situé à l'embouchure du fleuve Daugava (56°57'N ; 24°06'E), le port de Riga occupe une place incontournable dans le réseau portuaire de la Baltique.

Riga émane d'une grande tradition portuaire puisque c'est à la fin du XIII^{ème} siècle que la ville devint un port de commerce international entrant dans la Ligue Hanséatique. Fondée sur l'embouchure de la Daugava déjà utilisée pour le commerce entre la Baltique et la Mer Noire (Latvijas Institūts, 2001, 1), la ville de Riga se destinait déjà à devenir un poste maritime de renommée internationale. Pourtant, objet de convoitise des peuples voisins, la ville de Riga connut de nombreuses invasions notamment durant la Guerre de Livonie au XVI^{ème} siècle et l'invasion suédoise au XVII^{ème} siècle. Elle devint le premier port russe de la Mer Baltique en 1710 lors des hostilités russo-suédoises. Le port de Riga connut ensuite une croissance significative au XIX^{ème} siècle et en 1830, le premier bateau à vapeur suédois, *Oskar* y fit escale. En 1877, le port acquit son premier brise-glace (Freeport of Riga) et au début du XX^{ème} siècle, Riga était le premier port d'exportation de bois de l'empire russe.

Bien entendu, la Lettonie indépendante de la première moitié du XX^{ème} siècle dut faire face aux problèmes de navigation engendrés par la présence des glaces de mer. Ainsi, elle a acquis dans les années 1920 le brise-glace *Krisjanis Valdemars* (figure 26) – nom donné en hommage à l'homme qui a mis en place les premières écoles navales lettones – construit par deux compagnies britanniques de 1924 à 1925. Ce brise-glace fut la fierté de la flotte lettonne dans les années 1920 et 1930. Au début de la Seconde Guerre Mondiale, le navire fut envoyé à Tallinn mais en 1941, sur la ligne maritime reliant Tallinn à Kronstadt, il heurta une mine et coula. Il gît toujours dans les eaux de la Baltique par 100 mètres de fond⁴⁹.



Figure 26 – Le brise-glace *Krisjanis Valdemars*
 Figure 26 – The icebreaker *Krisjanis Valdemars*
 (Source : Latvijas Institūts, 2001, 11)

⁴⁹ D'après l'interview de Vello Mäss, archéologue maritime estonien, qui a découvert l'épave du *Krisjanis Valdemars* en août 2008. "Under the Baltic", *Journal Archeology*, 4 septembre 2008

Pendant la période soviétique de la seconde moitié du XX^{ème} siècle, l'un des plus grands terminaux de conteneurs de l'URSS fut implanté à Riga ainsi que des infrastructures pour l'exportation du gaz. Riga devint alors le seul port de la façade baltique de l'URSS qui assurait le trafic conteneurisé. Mais, le port avait perdu dès lors de son ampleur au profit de Tallinn et de Saint-Petersbourg.

De nos jours, la structure commerciale du trafic du port de Riga repose davantage sur le charbon et les produits pétroliers. Les cargos conteneurisés ne représentent plus que 6% du trafic total (figure 27). Toutefois le port de Riga détient une bonne part du trafic roulier et il tend à devenir la plaque tournante majeure pour le transit en Mer Baltique avec 80% des cargos s'acheminant en provenance et à destination de la Russie et des pays de la CEI (Thorez, 1998, 42 ; Apogs, 2006, 4 ; Thorez, *à paraître*).

Par ailleurs, le trafic peut être perturbé par la présence des glaces de mer posant certaines contraintes au port de Riga (Kovács et Spens, 2006, 432). La photographie 38 illustre les eaux portuaires prises en glace à Riga en 2006.

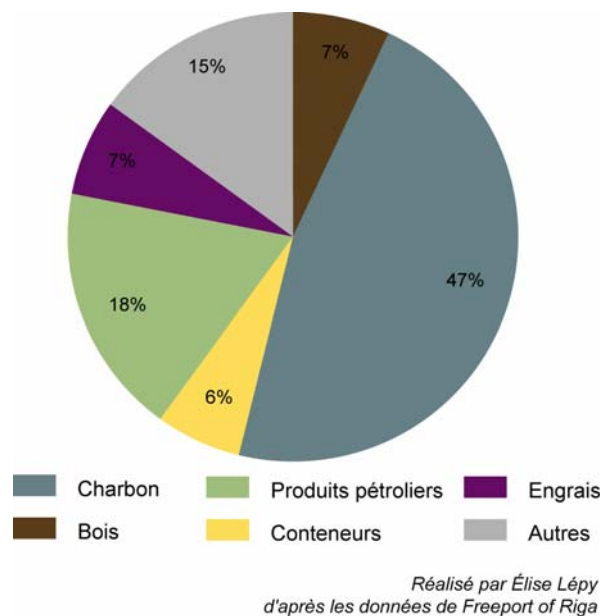


Figure 27 – Structure du trafic du port de Riga en 2008
Figure 27 – Traffic structure of the port of Riga in 2008



Photographie 38 – Le port de Riga englacé – Vue d’hélicoptère – 29 mars 2006

Picture 38– The port of Riga frozen – From the helicopter view – March 29th 2006

11.3.2 – La Baltique, comme espace géostratégique ancien

Les échanges commerciaux en Mer Baltique avaient déjà lieu au Moyen-Âge quand la Ligue Hanséatique formait une alliance entre villes commerçantes le long des côtes des mers du Nord et Baltique. Le sud de la Baltique était alors très convoité et les routes maritimes principales évitaient surtout les régions les plus englacées. Néanmoins, « *aux yeux des gens de cette époque, [la Baltique] n’était pas un cul de sac fermé par des rives glacées : c’était une voie d’échanges, s’ouvrant largement sur les fleuves russes, vers les grands marchés de Novgorod et de Smolensk, où affluaient des contrées les plus lointaines* » (Dollinger, 1988, 8).

Au-delà des échanges commerciaux, la Mer Baltique fut également, à cette époque, un lieu de confrontation et de guerre entre peuples riverains. Ainsi l’histoire de la Hanse fut marquée de désaccords et conflits entre villes marchandes. Pendant les hivers rudes du XVI^{ème} siècle par exemple, la banquise devint, dès que son épaisseur le permettait, un lieu où les combats et affrontements se déroulaient. Lorsqu’il s’avèrait impossible de prendre d’assaut les forteresses pendant l’été, les combattants attendaient le gel des eaux qui permettait de se déplacer et de s’approcher de l’ennemi (Magnus, 2004, Livre XI : 29, 273-274). O. Magnus cite particulièrement les combats entre les Suédois et les Moscovites dans le Golfe de Finlande. Leur violence était hélas la même sur la glace que

sur la terre ferme. Il était courant qu'aux endroits où des batailles navales eurent lieu l'été, des affrontements se disputassent l'hiver sur la glace entre les armées « pédestres » (*ibid.*, Livre XI : 2, 237-238). Il décrit les différentes batailles sur la glace, les machines utilisées sur la glace pour combattre l'ennemi, les manières de transporter l'artillerie sur la glace et les façons d'empêcher l'eau de geler pour éviter de se faire assiéger : ainsi les défenseurs creusaient la glace pour former une fosse qu'ils recouvraient de graisse de baleine et de phoque pour éviter le regel... (*ibid.*, Livre XI : 23). De plus, la banquise interdisait l'accès aux navires ennemis pour atteindre le fond des golfes.

Les nombreux affrontements entre les Suédois, les Finlandais, les Russes, les Allemands continuèrent aux XVII^{ème} et XVIII^{ème} siècles avec, au début du XIX^{ème} siècle, l'assujettissement politique de la Finlande (Grand-Duché autonome) par la Russie.

Plus tard, pendant la Seconde Guerre Mondiale, la Mer Baltique fut aussi un lieu de combat où se déroulaient les batailles navales entre Allemands et Soviétiques. Mais ces opérations navales furent perturbées par des conditions hivernales extrêmement sévères de 1939 à 1942 lors des hivers les plus froids du XX^{ème} siècle. Les glaces de mer recouvraient alors la quasi-totalité de la Mer Baltique. En 1941, alors que la flotte allemande avançait dans le Golfe de Finlande pour participer côté marin au siège de Léninegrad, elle fut freinée par la prise en glace des eaux marines entravant tout déplacement de navires dès le mois de décembre.

La Guerre Froide fut aussi une période importante du rôle géopolitique de la Mer Baltique. Elle constituait une frontière stratégiquement très sensible traversée par le Rideau de fer, du Nord de l'Allemagne à la Carélie. L'espace baltique se partageait alors entre pays de l'OTAN (Danemark et Norvège) ; le bloc de l'Est (URSS, Pologne et Allemagne de l'Est) ; et pays neutres (Suède et Finlande). La Mer Baltique représentait alors le seul espace géographique où un contact direct était possible entre l'URSS et l'Europe de l'Ouest. Elle assurait surtout à l'URSS un débouché maritime lui permettant d'atteindre l'Océan Atlantique même si l'OTAN contrôlait l'accès de la flotte soviétique aux détroits danois. La Baltique eut pendant cette période le rôle d'un glacis militaire, « *faisant peser aux régions riveraines des servitudes liées à cette situation de frontière* » (Orcier, 2005).

Mais le démantèlement du Rideau de fer et l'effondrement de l'URSS ont bouleversé ce rôle, d'autant plus que l'Union Européenne se mettait en place. Ainsi, la CEE comptait déjà l'Allemagne de l'Ouest comme pays co-fondateur, le Danemark fit son adhésion en 1973, la Suède et la Finlande en 1995, et la Pologne et les Pays baltes en 2004. Depuis l'élargissement de 2004, l'adhésion de ces quatre pays dont trois sont issus de l'effondrement du système soviétique, a entraîné un tournant dans la conception géopolitique et géostratégique de l'Union Européenne. L'espace baltique qui était une zone de passage et « *une ligne de division entre Ouest et Est, est désormais indéniablement*

amarré à l'Europe »⁵⁰. À plus d'un titre, l'élargissement de 2004 a fait de la Baltique un « *lac européen* » (Orcier, 2005) par l'adhésion de ses états riverains à l'exception de la région de Saint-Pétersbourg et de l'enclave de Kaliningrad sous souveraineté russe. D'autre part, avec la disparition de l'Union Soviétique, il ne reste plus que deux bases navales à la Russie, Kronstadt (oblast de Saint-Pétersbourg) bloquée par les glaces de mer en hiver, et Baltiisk (oblast de Kaliningrad) souvent libre de glace (Thorez, *à paraître*) et qui détient donc une position stratégique majeure en Mer Baltique. Mais en quinze ans, la Baltique est passée du rôle de glacis militaire à une mer économiquement ouverte au commerce international. Par ailleurs, malgré l'héritage historique de la situation géopolitique complexe de l'espace baltique, la volonté de rétablir les liens interrompus entre pays riverains pendant la Guerre Froide, s'est traduite par la mise en place de réseaux de coopération régionale pour le développement économique et environnemental de l'espace maritime et de ses bordures.

11.3.3 – « La Dimension Septentrionale » : vers une nouvelle « Hanse » étendue à toute la Baltique ?

11.3.3.1 – Les coopérations régionales

Le désir d'un développement économique régional pour la Baltique a abouti dans les années 1990 à la création d'organisations régionales tout en promouvant les intérêts de la région et en répondant aux changements géopolitiques qui ont eu lieu au sortir de la Guerre Froide. Ainsi, l'Union des Villes de la Baltique (UBC) en 1991, le Conseil des États de la Baltique (CBSS) en 1992, ou encore la Coopération Subrégionale des États de la Baltique (BSSSC) en 1993 ont été créés dans l'objectif premier de répondre aux besoins de développement économique, social et culturel de la région ainsi qu'aux problèmes environnementaux (pollution du milieu marin) de la Baltique.

Afin d'apporter plus de cohérence et une meilleure coordination entre les programmes de ces organisations, la Finlande proposa en 1997 un nouveau concept : « la Dimension Septentrionale » pour encourager la coopération transfrontalière des pays d'Europe du Nord avec la Russie en promouvant les intérêts politiques et économiques et l'interdépendance de l'UE avec les états voisins.

Récemment, le Parlement Européen a adopté en 2007, un rapport sur *"la stratégie pour la région de la Mer Baltique dans le cadre de la dimension septentrionale"*⁵¹, rapport qui fait suite à ce programme de coopération transfrontalière entre la Scandinavie, les pays baltes et la région de Saint-Pétersbourg. Le rapport précise que les objectifs d'une telle stratégie sont de « *soutenir la Dimension Septentrionale en faisant de la région de la Mer Baltique une de*

⁵⁰ Avant-propos, *Le Courrier des pays de l'Est* 2005/2, n° 1048, p. 3-3

⁵¹ Rapport P6_TA (2006)0494 du Parlement Européen

ses principales zones prioritaires », de « faire systématiquement de cette région l'une des zones les plus attrayantes et les plus compétitives du monde » et d' « améliorer l'état écologique de la Mer Baltique, actuellement l'une des régions maritimes les plus polluées au monde ». L'intérêt que suscite la Mer Baltique au sein de l'Europe fait d'elle « une mer intérieure, une mare nostrum, de l'Union Européenne »³ qui est aussi un point de rencontre géographique entre l'Union et la Russie. En effet, présente par sa façade baltique et particulièrement par l'enclave de Kaliningrad, la Russie continue de jouer un rôle important dans l'ensemble de la région baltique.

Dans l'optique de créer un véritable espace économique Nord-européen autour de la Mer Baltique, le secteur maritime a connu quelques mutations et de nouvelles organisations ont été créées afin de dynamiser davantage les flux et échanges entre les deux rives principales. En effet, la reconnexion entre les rives des pays de l'URSS et celles des pays de l'OTAN et neutres s'est passée par la mise en place d'un réseau de transport efficace autour de l'organisation d'une autoroute maritime de la Baltique pour favoriser la coordination des échanges.

D'autre part, les neuf pays riverains de la Baltique ont établi en 1991, à Copenhague, l'Organisation des Ports de la Baltique - le BPO (*Baltic Ports Organization*), afin de faciliter la coopération entre les ports. L'organisation compte désormais plus de 50 membres et ses objectifs sont d'améliorer la compétitivité du transport maritime dans la région baltique en augmentant l'efficacité des ports, en améliorant les infrastructures portuaires, en améliorant la coopération entre usagers et en introduisant les nouvelles technologies dans le secteur portuaire. Toutes ces initiatives sont propices à l'accroissement du trafic maritime ce qui entraîne alors des problèmes d'une part, environnementaux, et d'autre part, de sécurité maritime. Certains experts craignent donc l'augmentation des accidents en mer.

11.3.3.2 - La question très actuelle de la sécurité maritime

Actuellement, les deux priorités principales de l'Union Européenne pour la région de la Mer Baltique sont donc la préservation de l'environnement marin extrêmement pollué et la sécurité maritime. D'après les experts, l'amélioration de la sécurité maritime nécessiterait une nouvelle classification des navires notamment celle des pétroliers qui souvent, lors de collision ou d'échouage, provoquent des marées noires.

Or, alors qu'il existe un code des glaces commun à toute la région baltique, la navigation maritime en Mer Baltique est dominée par les classifications distinctes finno-suédoise et russe. Depuis plusieurs années, l'Union Européenne et la Russie ont émis la volonté de standardiser les « ice class » à tout le bassin baltique mais aussi à la route maritime du Nord (Arctique sibérien). Comme on l'a déjà vu, les différences entre les « ice

class » se basent principalement sur les exigences de solidité concernant la coque des navires et sur la puissance de leurs moteurs. L'objectif est donc d'harmoniser les réglementations de ces « ice class » définies par différentes sociétés de classification et d'instaurer des normes communes afin d'assurer une meilleure sécurité maritime. Les équivalences actuelles définissent la classe polaire CP6 comme la classe IA Super de la classification finno-suédoise. Par conséquent, les normes les plus élevées d'une nouvelle classification seraient destinées à la navigation arctique.

D'autre part, des coopérations de recherche, de sauvetage et de gestion des accidents se mettent en place entre pays riverains. Le cas de la Suède et de la Finlande est le plus exemplaire de la Baltique puisque les flottes de déglacage et d'assistance aux navires travaillent depuis assez longtemps en collaboration dans tout le Golfe de Botnie. Ce type de coopération devrait alors s'étendre à tout le bassin.

11.4 - CONCLUSION

De nos jours, la Baltique est considérée comme l'une des plus grandes autoroutes maritimes mondiales avec plus de 730 millions de tonnes transportées par voie maritime en 2003 (Institute of Shipping Analysis et *al.*, 2006, 43) et approximativement 7 millions de passagers par an transportés en ferry de Stockholm en Finlande et de Helsinki à Tallinn (*ibid.*, 48). Cette mer a donc un rôle majeur dans le commerce maritime européen et international.

On voit bien les questions multiples que posent désormais les évolutions environnementales et économiques en cours et à venir pour l'espace maritime considéré. Les premières tiennent, bien entendu, aux répercussions de la réduction – sinon de la disparition à notre avis peu probable – de la banquise hivernale. Certaines tiennent également aux répercussions dans le domaine de la vie et des activités traditionnelles ou actuelles de travail ou de loisir, mais aussi aux répercussions quant à l'activité maritime et portuaire de la région. On peut certes s'interroger de manière un peu pessimiste sur les effets négatifs, environnementaux, sociétaux et culturels, d'un recul important des glaces de mer hivernales, et sur la modification induite des paysages, de la faune et des pratiques des populations bordières.

Mais, dans un autre système de considérations balançant en quelque sorte le précédent, on peut voir aussi dans cette modification à venir de l'espace marin et de sa mise en valeur qui doit, semble-t-il, autant à la nature avec le probable changement climatique, qu'aux sociétés bordières avec les transformations géopolitiques et économiques contemporaines, les prémices positifs d'un nouvel ordre régional. À ce titre, en se souvenant qu'au Moyen-Âge la mise en place de la Ligue hanséatique avait déjà

accompagné une amélioration climatique, bien entendu favorable à la circulation maritime, on peut être tentée de trouver un parallèle avec la période actuelle et de concevoir que l'évolution environnementale et économique de la région baltique y conduira à l'établissement d'une véritable « nouvelle Hanse » dans cet espace maritime et portuaire.

Conclusion générale

En refermant la dernière page de ce travail sur les glaces marines saisonnières en Mer Baltique et sur leurs implications environnementales et sociétales sur les espaces marins et littoraux à partir de la comparaison des cas d'Oulu et de Riga, il est possible de dresser un bilan de recherche à divers niveaux. Il nous semble donc opportun de rappeler, d'une part, certains résultats notables apparus tout au long des développements, et de dégager d'autre part, quelques enseignements généraux montrant l'unité et l'originalité du cas baltique au sein des mers à banquise ainsi que la diversité interne de ce cas à l'échelle régionale. Il nous paraît également important de voir aussi si le sujet abordé éclaire d'une façon pertinente les questionnements actuels sur l'évolution climatique et le devenir relatif de l'espace géographique considéré et de ses sociétés.

Mer subpolaire, à des latitudes quasi tempérées pour sa partie méridionale, la Mer baltique connaît donc un phénomène de prise en glace hivernale de ses eaux, certes variable chaque année par son emprise géographique et son épaisseur, mais qui suffit pour y transformer l'espace littoral et marin en un désert blanc et glacé, souvent balayé par les vents et recouvert par la neige. La transformation nette de ses paysages se traduit par une véritable continentalisation du milieu et, bien entendu, par une modification tout aussi radicale des pratiques et des activités humaines qui s'y développent.

On a décrit l'ampleur physique de cette glaciellisation de la mer, sa variabilité interannuelle, et on a montré la particularité d'un développement de la banquise saisonnière ici lié à divers éléments géographiques. Tout d'abord, la Mer Baltique évolue dans un cadre géomorphologique particulier, une cuvette marine intra-continentale quasi fermée, jadis occupée par l'inlandsis quaternaire nord-européen, à l'Est du bourrelet scandinave, à l'Ouest de la plate-forme russe, et au Nord des plaines sédimentaires du centre-nord européen. D'autre part, ses eaux marines sont adoucies par les écoulements fluviaux continentaux et une difficile relation – *via* les détroits danois – avec la masse océanique de l'Atlantique et de ses mers bordières, d'où une glaciellisation parfois ralentie et inégale. Enfin, le climat froid, très froid parfois – ce facteur thermique est essentiel – pendant l'hiver où triomphent, à l'abri de la chaîne des Scandes, les influences anticycloniques russes et parfois sibériennes, même si l'atmosphère est souvent obscurcie par les tempêtes de neige. Mais dans les régions les plus méridionales de la Baltique, le retard de l'embâcle des glaces marines est perceptible et, à la fin de l'hiver, plus ou moins précocement, la débâcle de la banquise est souvent brutale, voire dangereuse, en

particulier sur ses bordures. Tout ce « système naturel » fait de la Mer Baltique un espace marin particulier par rapport aux autres mers à banquise, comme l'a montré par exemple la comparaison menée avec le cas de la Baie d'Hudson, même si il est sous l'influence générale de forçages atmosphériques et thermiques à l'échelle de l'Hémisphère nord.

Toutefois, à partir de l'étude détaillée du phénomène glaciaire dans les deux régions de comparaison, autour d'Oulu en Finlande et de Riga en Lettonie, on a vu une grande diversité interne d'échelle régionale et locale dans l'évolution interannuelle et le comportement tout au long de l'hiver de la banquise en Mer Baltique. Sa plus grande variabilité a été mise en évidence au Sud, le long des rivages baltes, alors qu'au Nord, surtout sur la façade finlandaise, le phénomène semble à la fois beaucoup plus pérenne dans le temps, d'une année sur l'autre, et spatialement plus stable dans ses manifestations marines et côtières.

Enfin, au sein des mers à banquise, l'une des originalités du cas baltique est aussi la grande modestie des effets géomorphologiques de l'action des glaces sur le littoral, toujours si on se réfère aux exemples illustratifs des secteurs côtiers d'Oulu et du Golfe de Riga et comparativement à certaines côtes canadiennes par exemple.

L'étude des implications sociétales, culturelles et économiques de la présence de la banquise hivernale en Mer Baltique a également souligné des points intéressants. D'une part, cette mer apparaît comme un milieu marin et côtier difficile et contraignant l'hiver où les pratiques, les usages, les modes d'occupation et d'exploitation – qu'ils soient très traditionnels ou, au contraire, très contemporains, sont fort divers, traduisant l'extraordinaire adaptabilité des populations face à lui. Certes ce milieu est contraignant, mais certainement pas « déterminant » au sens où il imposerait une « loi » naturelle dominant l'Homme. En effet, l'étude comparée des activités professionnelles ou ludiques sur les littoraux d'Oulu et de Riga, et celle des transports maritimes et de leur constante progression en relation avec une maîtrise technique croissante des routes maritimes hivernales et des ports, a montré que la perception, le vécu, l'appropriation de la banquise étaient fort différents du fait de l'histoire ancienne ou récente, du contexte socio-culturel et du niveau économique des populations riveraines. Alors qu'à Riga, on craint la banquise et que, tout compte fait, on la fréquente peu – à l'exception majeure, certes, des questions du commerce maritime et de transport désormais en grand développement et transformation –, au contraire sur les rivages d'Oulu, dans le Nord de la Finlande, on y maintient les pratiques de pêche et de chasse traditionnelles, on y développe la fréquentation touristique, on la considère, chaque hiver, comme un espace nouveau de vie et de liberté... On voit donc bien que le milieu physique – ici la banquise, avec ses froids terribles et ses excès météorologiques pourtant porteurs, comme on l'a vu, de risques variés et réels – n'est pas déterminant, mais que, tout simplement, il a occasionné de la part des uns

ou des autres des réactions sociétales et culturelles différentes liées tant à l'histoire – parfois lourde – qu'aux niveaux de développement économique contemporain.

D'ailleurs, il est apparu aussi à propos de l'étude du commerce maritime et de son développement actuel, que là, également, les facteurs de croissance sont liés à la meilleure maîtrise administrative, juridique et technique des conditions de navigation hivernale sur l'ensemble du bassin baltique, plutôt qu'à une simple conséquence d'une modification possible du système météomarin de la banquise. On n'omettra pas, bien entendu, de mentionner dans toute cette évolution « maritimiste » actuelle, le rôle évident de la disparition du bloc soviétique et du développement des relations structurelles et économiques internes à l'espace baltique, dans le cadre de l'intégration à l'Europe. C'est à ce titre qu'on a pu, par référence à un passé prestigieux, imaginer le développement d'une « Nouvelle Hanse », celle-là, bien entendu, ouverte vers le Golfe de Botnie du fait des progrès de la navigation hivernale.

De plus, la question des évolutions à venir, tant dans le domaine environnemental que dans le domaine socio-économique, reste très intéressante. Il faut sans doute considérer avec prudence l'application de scénarios de portée globale sur le réchauffement à l'échelle macro-régionale à régionale de la Mer Baltique, de sa banquise et de ses évolutions futures. Nous avons souligné la réactivité différente des glaces marines de part et d'autre du Golfe de Botnie, plus variables du côté suédois, mais plus stables du côté finlandais, surtout vers le Nord. Mais, par ailleurs, la comparaison récente des données climato-maritimes à Oulu et à Riga souligne aussi des analogies certaines dans les évolutions. Il est donc apparemment difficile de se prononcer quand à une évolution à venir et sans doute faut-il convenir de fait que le cas des glaces marines hivernales de la Baltique n'est pas forcément significatif d'une évolution plus globale que beaucoup de travaux extrapolent ailleurs. En toute hypothèse, d'après les entretiens avec les « acteurs » de la banquise, on peut penser que le futur et ses incertitudes environnementales n'y inquiète pas trop les populations riveraines qui sont, à nouveau, prêtes à s'adapter.

Bien entendu, on est consciente, à la fin de ce travail, de certaines de ses imperfections et de quelques lacunes. Les unes sont dues, sans doute, surtout dans la période de démarrage de la thèse, à notre manque d'expérience en tant que chercheur même si notre Maîtrise au Québec nous avait un peu préparé à affronter ce type de milieu et les problèmes qu'il impliquait. Il a fallu faire face à la distance, aux langues inconnues, aux séjours plus ou moins longs sur le terrain, toujours riches de connaissances nouvelles et de contacts humains. Nous percevons aussi un certain déséquilibre dans la comparaison régionale abordée entre le secteur d'Oulu et celui de Riga qui s'est avéré d'un abord plus difficile pour les raisons d'ordre culturel et historique déjà évoquées.

Pourtant cette comparaison – du fait même des différences qu'elle induisait – s'est avérée riche de sens pour notre étude et elle a permis d'étayer des conclusions et des hypothèses valables pour toute la Mer Baltique à propos de ses glaces marines et de leurs incidences sociétales. Nous aurions, bien entendu, aimé élargir l'approche fine du côté suédois, vers le Sud de la Finlande et surtout à l'extrême Est, vers le fond du Golfe de Finlande, aux confins du monde russe. Il y a là sans doute bien des possibilités d'élargir les champs d'investigation en Mer Baltique et il y aurait certainement grand intérêt à y confirmer ou nuancer dans l'avenir les résultats présentés dans ce travail. De même d'autres terrains de comparaison mériteraient là aussi des recherches parallèles autant tournées vers l'étude de leur milieu marin hivernal que vers celles des sociétés riveraines, de leur vulnérabilité et de leurs activités : on pense à la Baie d'Hudson déjà évoquée, à la Mer d'Okhotsk elle aussi souvent abordée. On voit qu'il reste de vastes possibilités où l'étude régionale intégrant Nature et Sociétés, propre à la démarche géographique, des glaces marines peut susciter encore bien des travaux et des vocations.

Références bibliographiques

ACERBI Giuseppe – 1804a, *Voyage au Cap Nord, par la Suède, la Finlande et la Laponie*, Tome second, Paris, Levrault, Schoell et Compagnie, 429 p.

ACERBI Giuseppe – 1804b, *Voyage au Cap Nord, par la Suède, la Finlande et la Laponie*, Collection de planches, Paris, Levrault, Schoell et Compagnie

ADAMS John Quincy – 1781-1783, *The diaries of John Quincy Adams*, www.masshist.org/jqadiaries

ALCAMO Joseph, MORENO José, NOVÁKY Béla, BINDI Marco, COROBOV Roman, DEVOY Robert, GIANNAKOPOULOS Christos, MARTIN Eric, OLESEN Jørgen, SHVIDENKO Anatoly – 2007, "Europe" in *Climate change 2007: impacts, adaptation, vulnerability. Contribution of working group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Cambridge Press University, pp. 541-580

ALESTALO Jouko – 1979, "Landuplift and development of the littoral and aeolian morphology on Hailuoto, Finland", *Acta Universitatis Ouluensis*, A 82 Geol. 3, pp. 109-120

ALESTALO Jouko, HÄIKIÖ Jukka – 1976, "Ice features and ice-trust shore forms at Luodonselkä, Gulf of Bothnia, in winter 1972/73", *Fennia*, 144, 24 p.

ALESTALO Jouko, HEIKKINEN Olavi, TABUCHI Hiroshi – 1986, "Sea ice deformation in the Bothnian Bay off Hailuoto, Finland, in March 1986", *Bothnian Bay reports*, 4, pp. 51-63

ALENIUS Pekka, MAKKONEN L. – 1981, "Variability of the annual maximum ice extent of the Baltic Sea", *Archives for meteorology, geophysics, and bioclimatology*, Serie B, 29, pp. 393-398

ALLARD Michel, CHAMPAGNE Paul – 1980, "Dynamique glacielle à la pointe d'Argentenay, île d'Orléans, Québec", *Géographie physique et quaternaire*, 34, pp. 159-174

ALLARD Michel, MICHAUD Yves, RUZ Marie-Hélène, HEQUETTE Arnaud – 1998, "Ice foot, freeze-thaw of sediments, and platform erosion in a sibarctic microtidal environment, Manitounuk Strait, Northern Quebec, Canada", *Canadian Journal of Earth Sciences*, 35, pp. 965-979

AMAT Jean-Paul, DORIZE Lucien, LE CŒUR Charles – 2002, *Éléments de géographie physique*, Paris, Bréal, 464 p.

ANDRE Marie-Françoise – 2005, "La fusion des glaces polaires: mythe ou réalité" in *M-F. André (ed.) Le monde polaire : mutations et transitions*, Paris, Ellipses, pp. 11-24

AOTA Masaaki, ISHIKAWA Masao, UEMATSU Eriko – 1989, "Variations in ice concentration off Hokkaido Island", *Low temperature science*, Series A, 47, pp. 161-175

APOGS Haralds – 2006, "Plan the city with the port – Strategies for redeveloping City-Port linking spaces", *PCP Project – Newsletter* n°3, 12 p.

ARTELA Tom – 1979, "Icebreaker navigation and assistance technique 1877-1977" in *Ice, ships and winter navigation*, Board of Navigation, pp. 264-278

- AUTIO Jyrki, HEIKKINEN Olavi** – 2002, "The climate of northern Finland", *Fennia*, 180, pp. 61-66
- AXELL Lars, LINDQUIST Katarina** – 2007, "Reconstruction of annual maximum ice extent in the Baltic Sea 1660-2005", *Berichte des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie*, n°42, pp. 79-80
- BACHARACH François** – 2006, "La Lettonie et le monde russe", *Le courrier des pays de l'Est*, 6, n°1058, pp. 70-76
- BALTIC ICE-BREAKING MANAGEMENT** – 2006, *Baltic Sea Icebreaking Report 2005-2006*, 29 p.
- BALTIC ICE-BREAKING MANAGEMENT** – 2007, *Baltic Sea Icebreaking Report 2006-2007*, 29 p.
- BALTIC ICE-BREAKING MANAGEMENT** – 2008, *Baltic Sea Icebreaking Report 2007-2008*, 28 p.
- BARTHOLOMEW John** (ed.) – 1955, *The Times Atlas of the World*, Volume III Northern Europe, London, The Times publishing company Ltd
- BAYOU Céline** (ed.) – 1999, "La Baltique : un nouvel espace de l'Europe", *Géoéconomie*, n°11, 133 p.
- BAYOU Céline** – 2006, "La Lettonie 2005-2006. Le pays de tous les records", *Le courrier des pays de l'Est*, 4, n°1056, pp. 23-38
- BELCHANSKY Gennady, DOUGLAS D.C., PLATONOV N.G.** – 2004, "Duration of the Arctic Sea ice melt season: regional and interannual variability, 1979-2001", *Journal of climate*, 17, 1, pp. 67-80
- BELCHANSKY Gennady, EREMEEV V.A., PLATONOV N.G.** – 2007, "Study of variability of the Arctic sea ice thickness (1982-2003)", *Doklady Earth Sciences*, 413, 3, pp. 393-396
- BELGLUND Robin, KOTOVIRTA Ville, SEINÄ Ari** – 2006, "IBPlott – A system for operational use of spaceborne SAR information in the Baltic Sea", *Proceedings OceanSAR 2006 – Third Workshop on coastal and marine applications of SAR*, 4p.
- BELL W.T, OGILVIE A.E.J** – 1978, "Weather compilations as a source of data for the reconstruction of european climate during the medieval period", *Climatic change*, 1, pp. 331-348
- BERGER André** – 1992, *Le climat de la Terre : un passé pour quel avenir ?*, Bruxelles, De Boeck-Wesmael, 479 p.
- BLANC-NOEL Nathalie** – 2002, "Importance et caractéristiques de la région de la Baltique" in N. Blanc-Noël (ed.) : *La Baltique, une nouvelle région en Europe*, Paris, L'Harmattan, pp. 17-30
- BOYER Régis** – 1976, *Les Vikings et leur civilisation : problèmes actuels*, Paris, Mouton, 242 p.
- BUCHHOFFER Ekkehard** – 1995, "Transport infrastructure in the Baltic States during the transformation to market economies", *Journal of transport geography*, 3, n°1, pp. 69-75
- BYRNE Mary-Louise, DIONNE Jean-Claude** – 2002, "Typical aspects of cold regions shorelines" in K. Hewitt : *Landscapes of transition*, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, pp. 141-158
- CABOURET Michel** – 1967, "La transhumance du mouton dans le Sud-Ouest de la Norvège", *Norsk geografisk tidsskrift*, 21, pp. 3-38
- CABOURET Michel** – 1972, "Une nouvelle géographie régionale de la Suède", *Annales de géographie*, pp. 103-107

- CABOURET Michel**, dir. DE PLANHOL Xavier – 1980, *La vie pastorale dans les montagnes et les forêts de la péninsule scandinave I-VII*, Thèse de Doctorat, Université Paris – Sorbonne
- CABOURET Michel** – 1987, "Les Lapons", *Annales de géographie*, 535, pp. 347-351
- CABOURET Michel** – 1988, "Chronique scandinave : une région marginale en Finlande, la Carélie du Nord", *Hommes et Terres du Nord*, n°3, pp. 177-185
- CABOURET Michel** – 1990, "La « Région » d'Oulu, un « Moyen-Nord » en Finlande", *Hommes et Terres du Nord*, n°1, pp. 30-48
- CABOURET Michel** – 1992, "Öland et Gotland, court essai sur le degré d'insularité dans une mer intérieure, la Baltique", *Hommes et Terres du Nord*, n°4, pp. 190-205
- CABOURET Michel** – 2005, *La Finlande*, Paris, Karthala, 490 p.
- CAMENA D'ALMEIDA Pierre**, sous la direction de VIDAL DE LA BLACHE Paul et GALLOIS Lucien – 1932, *Géographie universelle – Tome V - États de la Baltique, Russie*, Paris, Armand Colin, 355 p.
- CASSOU Christophe, TERRAY Laurent** – 2003, "L'Oscillation Nord Atlantique", *Lettre n°15 Programme International Géosphère Biosphère – Programme mondial de recherches sur le climat (PIGB – PMRC)*
- CHABOT Georges** – 1958, *L'Europe du Nord et du Nord-Ouest. Tome 2 : Finlande et pays scandinaves*, Paris, PUF, 371 p.
- CHAMPONNOIS Suzanne, DE LABRIOLLE François** – 1999, *La Lettonie*, Paris, Khartala, 346 p.
- CHAUSSADE Jean, CORLAY Jean-Pierre** – 1990, *Atlas des pêches et des cultures marines, France, Europe, Monde*, Rennes, Ed. Ouest-France, 252 p.
- CHEN Deliang, HELLSTRÖM Cecilia** – 1999, "The influence of the North Atlantic Oscillation", *Tellus*, 51 A, pp. 505-516
- CHRISTENSEN Jens Hesselbjerg, HEWITSON Bruce, BUSUIOC Aristita, CHEN Anthony, GAO Xuejie, HELD Isaac, JONES Richard, KOLLI Rupa Kumar, KWON Won-Tae, LAPRISE René, MAGAÑA RUEDA Victor, MEARNES Linda, MENÉNDEZ Claudio Guillermo, RÄISÄNEN Jouni, RINKE Annette, SARR Abdoulaye, WHETTON Penny** – 2007, "Regional climate prejections" in *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Cambridge University Press, pp. 847-940
- CLARKE Edward. D.** – 1838, *Travels in various countries of Scandinavia*, Vol. II, London, Cadell and Davies, 555 p.
- CONSETT Matthew** – 1789, *Tour through Sweden – Swedish Lapland, Finland and Denmark*, London, Johnson-Goldsmith-Lewis-Christopher, 157 p.
- COSTA Stéphane, GOURMELON Françoise, AUGRIS Claude, CLABAUT Philippe, LATTEUX Bernard** – 2005, "Apport de l'approche systémique et pluridisciplinaire dans l'étude du domaine littoral en et marin de la Seine-Maritime", *Noröis*, n°196/3, pp. 91-108
- COUDÉ Armel, COUDÉ GAUSSEN Geneviève** – 2005, "De l'écosystème au géosystème. Ou heurs et malheurs de l'application de la notion de géosystème en Géographie physique", *Cahiers de la MRSH / Caen*, n° spécial, avril 2005, pp. 101-115

COULIOU Jean-René – 2006, "L'évolution des capacités des flottilles de pêche de l'Union européenne" in J. Chaussade et J. Guillaume (ed.) : *Pêche et aquaculture*, Rennes, Presses Universitaires de Rennes, pp. 23-40

COXE William – 1786, *Voyages en Pologne, Russie, Suède, Danemark*, Tome second, Genève, Barde, Manget et Co., 382 p.

DAKE Karl – 1991, "Orienting dispositions in the perception of risk", *Journal of cross-cultural psychology*, 22, n°1, pp. 61-82

DAKE Karl – 1992, "Myths of nature : culture and social construction of risk", *Journal of social issues*, 48, n°4, pp. 21-37

DE MARTONNE Emmanuel – 1958, *Traité de géographie physique – Tome second – Le relief du sol*, Dixième édition, Paris, Armand Colin, pp. 499-1057

DIONNE Jean-Claude – 1969, "Érosion glacielle littorale, estuaire du Saint-Laurent", *Revue de Géographie de Montréal*, XXIII, n°1, pp. 5-20

DIONNE Jean-Claude, dir. **GUILCHER André** – 1970, *Aspects morpho-sédimentologiques du glacier, en particulier des côtes du Saint-Laurent*, Thèse de Doctorat, Université Paris-Sorbonne

DIONNE Jean-Claude – 1972, *Livret-guide pour l'excursion du comité international pour l'histoire des sciences géologiques*, Québec, Ministère Canadien de l'Environnement, 26 p.

DIONNE Jean-Claude – 1973a, "L'action mystérieuse du glacier", *GEOS*, 2 p.

DIONNE Jean-Claude – 1973b, "La notion de pied de glace (icefoot), en particulier dans l'estuaire du Saint-Laurent", *Cahiers de géographie de Québec*, 17, n°41, pp. 221-250

DIONNE Jean-Claude – 1976, "L'action glacielle dans les schorres du littoral de la Baie de James", *Cahiers de géographie du Québec*, 20, n°50, pp. 303-326

DIONNE Jean-Claude – 1985, "Formes, figures, et faciès sédimentaires glaciels des estrans vaseux des régions froides", *Paleogeography, paleoclimatology, paleoecology*, 51, pp. 415-451

DIONNE Jean-Claude – 1987, *Aperçu des aspects quaternaires du glacier. XIIème Congrès de l'INQUA – Ottawa*, Non publié

DIONNE Jean-Claude – 1989, "Bibliographie du périglaciaire du Québec, 1969-1989, incluant le glacier pour la période 1960-1989", *Géographie physique et quaternaire*, 43, n°2, pp. 233-243

DIONNE Jean-Claude – 1999, "L'érosion des rives du Saint-Laurent – Vue d'ensemble et état de la question", *Actes du Colloque régionale sur l'érosion des berges, Baie-Comeau, 19-21 Février 1999*, 18 p.

DIONNE Jean-Claude, LAVERDIÈRE Camille – 1972, "Ice formed beach features from Lake St.Jean, Quebec", *Canadian Journal of Earth Sciences*, 9, n°8, pp. 979-990

DOLLINGER Philippe – 1988, *La Hanse, XII^e – XVII^e siècles*, Paris, Aubier, 598 p.

DREIFELDS Juris – 1996, *Latvia in transition*, Cambridge, Cambridge University Press, 214 p.

DOUGLAS Mary, WILDAVSKY Aaron – 1982, *Risk and culture. An essay on the selection of technical and environmental dangers*, Berkeley, University of California Press, 221 p.

EBERHARDS Guntis, 2003, *Latvijas jūras krasti*, Riga, Latvijas Universitāte, 292 p.

- EBERHARDS Guntis, SALTUPE Baiba** – 1996, "Accelerated coastal erosion – Implications for Latvia", *Baltica*, 9, pp. 16-28
- EKMAN Martin, MÄKINEN Jaako** – 1996, "Recent postglacial rebound, gravity change and mantle flow in Fennoscandia", *Geophysical Journal International*, 126, Issue 1, pp. 229-234
- EHLIN Ulf** – 1981, "Hydrology of the Baltic Sea" in *A. Voipio (ed.) : The Baltic Sea*, Amsterdam, Elsevier oceanographic series, pp. 123-134
- ERONEN Matti** – 2005, "Land uplift : virgin land from the sea" in *M. Seppälä (ed.) : The physical geography of Fennoscandia*, Oxford, Oxford University Press, pp. 17-34
- ESCOURROU Gisèle** – 1983, "Quelques reflexions sur l'influence de la neige et de la glace dans les régions polaires ou de haute montagne", *Physio-Géo*, n°8, pp. 53-57
- EUROSION** – 2002, *Gulf of Riga (Latvia)*, 17p.
- EUROSION** – 2004, *Living with coastal erosion in Europe : sediment and space for sustainability – Part II - Maps and statistics*, 25 p.
- FINNISH GAME AND FISHERIES RESEARCH INSTITUTE** – 2006, *Vesiviljely 2005. Aquaculture 2005*, Helsinki, Finnish Game and Fisheries Research Institute, 16 p.
- FINNISH INSTITUTE OF MARINE RESEARCH** – 1997, *The cool facts about navigating in ice*, Brochure du FIMR
- FINNISH MARITIME ADMINISTRATION** – 2008, "Ice class regulations 2008 (Finnish-Swedish ice class rules)", *Finnish Maritime Administration Bulletin*, 48 p.
- FLOHN Hermann, FANTECHI Roberto** – 1984, *The climate of Europe: past, present and future*, Dordrecht, Reidel Publishing Company, 356 p.
- FORBES Donald L., TAYLOR Robert B.** – 1994, "Ice in the shore zone and the geomorphology of cold coasts", *Progress in Physical Geography*, 18, 1, pp. 59-89
- FORD James, GOUGH William, LAIDLER Gita, MACDONALD John, INRGAUT Celina, QRUNNUT Kevin** – 2009, "Sea ice, climate change, and community vulnerability in northern Foxe Basin, Canada", *Climate research*, 38, pp. 137-154
- FOREST André** – 2006, "L'épuisement des ressources : mythe ou réalité ?" in *J. Chaussade et J. Guillaume (ed.) : Pêche et aquaculture*, Rennes, Presses Universitaires de Rennes, pp. 89-100
- FREEPORT OF RIGA AUTHORITY** – 2009, *Handbook 2008*, 73 p.
- FRENCH Hugh M.** – 2007, *The Periglacial Environment*, 3^{ème} édition, Chichester, Wiley, 458 p.
- FRISÉN Rune, JOHANSSON Carl Erik, SUOMINEN Veli** – 2005, "Archipelagos in the Baltic Sea" in *M. Seppälä (ed.) : The physical geography of Fennoscandia*, Oxford, Oxford University Press, pp. 267-281
- GAGNON Alexandre, GOUGH William** – 2005, "Trends in the dates of ice freeze-up and breakup over Hudson Bay, Canada", *Arctic*, 58, n°4, pp. 370-382
- GALLEY R.J., KEY E., BARBER D.G., HWANG B.J., EHN J.K.** – 2008, "Spatial and temporal variability of sea ice in the Southern Beaufort Sea and Amundsen Gulf : 1980-2004", *Journal of geophysical research*, 113, C5, C05S95

- GARDINI Bruno, GRAF G., RATIER Guy** – 1995, "The instruments on Envisat", *Acta Astronautica*, 37, pp. 301-311
- GAUMIGA R., KARLSONS G., UZARS D., OJAVEER H.** – 2007, "Gulf of Riga (Baltic Sea) fisheries in the late 17th century", *Fisheries Research*, 87, pp. 120 -125
- GEORGELIN Yvon, GASSEND Jean-Marie, JOURNES Hugues** – 2002, "Pythéas, astronome et explorateur", *Bulletin de l'union des physiciens*, n°840, pp. 19-52
- GERMANIS Andris** – 2004, "Četru gadalaiku septiņas sejas⁵²", *Vides Vēstis*, n°10 (73), pp. 16-31
- GIRET Alain** – 2007, *Géographie de l'écoulement fluvial*, Paris, L'Harmattan, 354 p.
- GOELDNER Lydie** – 1993, "Compte-rendu Géographie et droit du littoral", *Mappemonde*, 1/93, p.4
- GOUGH William A., CORNWELL Adam R., TSUJI Leonard J.S.** – 2004, "Trends in seasonal sea ice duration in Southwestern Hudson Bay", *Arctic*, 57, n°3, pp. 299-305
- GOW Anthony, WEEKS Wilford, KOSLOFF Pekka, CARSEY Susan** – 1992, "Petrographic and salinity characteristics of brackish water ice in the Bay of Bothnia", *CRREL Report 92-13*, 38 p.
- GRANSKOG Mats, EHN Jens, NIEMELÄ Matti** – 2005, "Characteristics and potential impacts of under-ice river plumes in the seasonally ice-covered Bothnian Bay (Baltic Sea)", *Journal of Marine Systems*, 53, pp. 187-196
- GRANSKOG Mats, KAARTOKALLIO Hermann, KUOSA Harri, THOMAS David N., VAINIO Jouni** – 2006, "Sea ice in the Baltic Sea – A review", *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 70, pp. 145-160
- GRENFELL Thomas C., PEROVICH Donald K.** – 2004, "Seasonal and spatial evolution of albedo in a snow-ice-land-ocean environment", *Journal of Geophysical Research*, 109, C1, C01001, 15p.
- GRÖNWALL Hannu** – 1988, "Finnish ice service", *Finnish Marine Research*, n° 256, pp. 95-110
- GUILCHER André** – 1954, *Morphologie littorale et sous-marine*, Paris, PUF, 216 p.
- GUILCHER André** – 1958, *Coastal and submarine morphology*, London, Methuen, 274 p.
- GUILCHER André, BEAUJEU-GARNIER Jacqueline** – 1958, *L'Europe du Nord et du Nord-Ouest ; Tome 1 : Généralités physiques et humaines*, Paris, PUF, 258 p.
- GUILLAUME Jacques**, dir. BEAUJEU-GARNIER Jacqueline – 1994, *Les transports maritimes et la Norvège, Étude des faits et conséquences de la circulation par la mer*, Thèse d'État, Université de Paris I, 725 p.
- GUILLAUME Jacques** (sous la dir.) – 2008, *Les transports maritimes dans la mondialisation*, Paris, L'Harmattan, 279 p.
- GUSTAFSSON Nils, NYBERG Leif, OMSTEDT Anders** – 1998, "Coupling of a high-resolution atmospheric model and an ocean model for the Baltic Sea", *Monthly Weather Review*, 126, pp. 2822-2846
- HAAPALA Jari** – 2000a, "On the modelling of ice-thickness redistribution", *Journal of glaciology*, 46, n°154, pp. 427-437

⁵² Quatre saisons, sept visages

- HAAPALA Jari**, dir. **LEPPÄRANTA Matti** – 2000b, "Modelling of the seasonal ice cover of the Baltic Sea", Thèse de Doctorat, *Report series in geophysics*, n°42, 41 p.
- HAAPALA Jari**, **JUOTTONEN Arja**, **MARNELA Marika**, **LEPPÄRANTA Matti**, **TUOMENVIRTA Heikki** – 2001a, "Modelling the variability of the sea-ice conditions in the Baltic Sea under different climate conditions", *Annals of Glaciology*, 33, pp. 555 - 559
- HAAPALA Jari**, **LEPPÄRANTA Matti** – 1996, "Simulating the Baltic Sea ice season with a coupled ice-ocean model", *Tellus*, 48A, pp. 622-643
- HAAPALA Jari**, **LEPPÄRANTA Matti** – 1997, "The Baltic Sea ice season in changing climate", *Boreal environment research*, 2, pp. 93-108
- HAAPALA Jari**, **MEIER H.E Markus**, **RINNE Juhani** – 2001b, "Numerical investigations of future ice conditions in the Baltic Sea", *Ambio*, Vol.30, n°4-5, pp. 237-244
- HAGEN Eberhard**, **FEISTEL Rainer** – 2005, "Climatic turning points and regime shifts in the Baltic Sea region: the Baltic winter index (WIBIX) 1659-2002", *Boreal environment research*, 10, pp. 211-224
- HALKKA Antti**, **HELLE Eero**, **HELANDER Björn**, **JÜSSI Ivar**, **JÜSSI Mart**, **KARLSSON Olle**, **SOIKKELI Martti**, **STENMAN Olavi**, **VEREVKIN Mikhail** – 2005, "Numbers of grey seals counted in censuses in the Baltic Sea, 2000-2004", *Symposium on biology and management of seals in the Baltic area*, 15-18 February 2005, Helsinki, pp. 16-17
- HAMELIN Louis-Edmond** – 1994, "Lexicalisation du néologisme glacial", *Cahiers de lexicologie* 64, 1, pp. 53-57
- HAMELIN Louis-Edmond**, **COOK Franck** – 1967, *Le périglaciaire par l'image*, Québec, Les Presses de l'Université Laval, 237 p.
- HAMELIN Louis-Edmond**, **Letarte Jacques** – 1966, "Glace de rive et haut estran, île d'Orléans. Évolution depuis 1957", *Bulletin de l'Association française pour l'étude du Quaternaire*, 3, pp. 112-119
- HÄNNINEN Samuli** – 2003, "Incidents and accidents in winter navigation in the Baltic Sea, Winter 2002 – 2003", *Winter navigation research board*, n°54, 39 p.
- HANSSON Daniel**, **OMSTEDT Anders** – 2008, "Modelling the Baltic Sea ocean climate on centennial time scale : temperature and sea ice", *Climate dynamics*, 30, pp. 763-778
- HARE Kenneth**, **THOMAS Morley** – 1974, *Climate Canada*, Toronto, Wiley, 256 p.
- HEINO Raino** – 1978, "Climatic changes in Finland during the last hundred years", *Fennia*, 150, pp. 3-13
- HELCOM** – 2006, *Maritime transport in the Baltic Sea*, Helsinki, HelCom, 24 p.
- HELCOM** – 2007a, "Climate change in the Baltic Sea area – HelCom thematic assessment in 2007", *Baltic Sea Environment Proceedings n°111*, 49 p.
- HELCOM** – 2007b, "Baltic Sea region air temperature likely to achieve 3°C to 5°C increase this century", Communiqué de presse du 7 mars 2007
- HELLE Eero**, **STENMAN Olavi** – 2005, "Management of the seal populations in the Baltic area", *Symposium on biology and management of seals in the Baltic area*, 15-18 February 2005, Helsinki, pp. 80-84

HEQUETTE Arnaud, dir. MOIGN Annik – 1986, *Morpho-sédimentologie et évolution des littoraux meubles en milieu arctique*, Thèse de Doctorat, Université de Bretagne Occidentale, 197 p.

HEQUETTE Arnaud – 1989, "L'influence de la glace de mer sur l'érosion littorale en Mer de Beaufort canadienne", *Revue de géomorphologie dynamique*, n°3, pp. 81-98

HOUSER Christopher, GOUGH William A. – 2003, "Variations in sea ice in the Hudson strait 1971-1999", *Polar Geography*, 27, n°1, pp. 1-14

HYVÄRINEN Veli – 2003, "Trends and characteristics of hydrological time series in Finland", *Nordic Hydrology*, 34, n°1-2, pp. 71-90

HYVÄRINEN Veli, KAJANDER Juha – 2005, "Rivers and lakes in Fennoscandia" in M. Seppälä (ed.) : *The physical geography of Fennoscandia*, Oxford, Oxford University Press, pp. 135-157

INKINEN Tommi – 2003, "Exploring the information society: experiences from Finland", *NetCom*, 17, pp. 249-268

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE – 1974, *1^{er} Colloque international sur l'action géologique des glaces flottantes. Le glacier*, Université du Québec, 51 p.

INSTITUTE OF SHIPPING ANALYSIS, BMT TRANSPORT SOLUTIONS GMBH, CENTRE FOR MARITIME STUDIES – 2006, *Baltic Maritime Outlook : Good flows and maritime infrastructure in the Baltic Sea Region*, Uddevalla, 116 p.

ISHIKAWA Masao, TAKATSUKA Toru, DAIBO Takaharu, SHIRASAWA Kunio – 2004, "Distributions of pack of in the Okhotsk Sea off Hokkaido observed using a sea-ice radar network, January-April 2003", *Low temperature science*, Series A, 62, pp. 19-48

JAAGUS Jaak – 2006, "Trends in sea ice conditions in the Baltic Sea near the Estonian coast during the period 1949/1950 – 2003/2004 and their relationships to large-scale atmospheric circulation", *Boreal environment research*, 11, pp. 169-183

JALONEN Risto, RISKÄ Kaj, HÄNNINEN Samuli – 2005, "A preliminary risk analysis of winter navigation in the Baltic Sea", *Winter navigation research board*, n°57, 206 p.

JAUHIAINEN Jussi – 2006, "Multipolis : high-technology network in Northern Finland", *European Planning Studies*, 14, n°10, pp. 1407-1428

JEVREJEVA Svetlana – 2000, "Long-term variability of sea ice and air temperature conditions along the Estonian coast", *Geophysica*, 36, 1-2, pp. 17-30

JEVREJEVA Svetlana – 2001, "Severity of winter seasons in the northern Baltic Sea between 1529 and 1990: reconstruction and analysis", *Climate research*, 17, pp. 55-62

JEVREJEVA Svetlana, DRABKIN Vadim, KOSTJUKOV J., LEBEDEV A., LEPPÄRANTA Matti, MIRONOV Yevgeny, SCHMELZER Natalija, SZTOBRYN Marzenna – 2004, "Baltic Sea Ice seasons in the twentieth century", *Climate Research*, 25, pp. 217-227

JEVREJEVA Svetlana, LEPPÄRANTA Matti – 2002, "Ice conditions along the Estonian coast in a statistical view", *Nordic Hydrology*, 33, 2-3, pp. 241 - 262

JEVREJEVA Svetlana, MOORE John C. – 2001, "Singular spectrum analysis of Baltic Sea ice conditions and large-scale atmospheric patterns since 1708", *Geophysical Research Letters*, 28, n°23, pp. 4503-4506

JÓHANNESSON Tómas, JÓNSSON Trausti, KÄLLÉN Erland, KAAS Eigil – 1995, "Climate change scenarios for the Nordic countries", *Climate research*, 5, pp. 181 - 195

JOHANSSON Åke, BARNSTON Anthony, SAHA Suranjana, VAN DEN DOOL Huug – 1998, "On the level and origin of seasonal forecast skill in Northern Europe", *Journal of the atmospheric sciences*, 55, pp. 103-127

JOHANSSON B. M. – 1977, "Economics of winter navigation in the northern part of the Gulf of Botnia", *Winter Navigation Research Board*, Research Report n°20, 8p.

JOHANSSON Carl Erik – 2005, "Rivers draining into the Gulf of Bothnia" in M. Seppälä (ed.) : *The physical geography of Fennoscandia*, Oxford, Oxford University Press, pp. 325-348

JOSEPHANS Heiner, ZEVENHUIZEN J. – 1990, "Dynamics of the Laurentide ice sheet in Hudson Bay, Canada", *Marine Geology*, 92, pp. 1-26

JOURDAIN Nicolas, dir. GALLEE Hubert – 2007, *Simulations climatiques régionales couplées atmosphère – océan – glace de mer en Antarctique*, Thèse de Doctorat, Université Joseph Fournier, Grenoble 1, 163 p.

JURVA Risto – 1937, "Über die Eisverhältnisse des Baltischen Meeres an den Küsten Finnlands"⁵³, *Merentutkimuslaitoksen Julkaisu*, 114, 51 p.

JURVA Risto – 1952a, "A general handbook on the geography of Finland", *Fennia*, 72, pp. 136-160

JURVA Risto – 1952b, "On the variations and changes of freezing in the Baltic during the last 120 years", *Fennia*, 75, pp. 17-24

JURVA Mikko, RISKKA Kaj – 2002, "On the power requirement in the Finnish-Swedish ice class rules", *Winter navigation research board*, Research report n°53, 80 p.

JYLHÄ Kirsti, FRONZEK Stefan, TUOMENVIRTA Heikki, CARTER Timothy, RUOSTEENOJA Kimmo – 2008, "Changes in frost, snow and Baltic sea ice by the end of the twenty-first century based on climate model projections for Europe", *Climatic change*, 86, pp. 441-462

KANKAANPÄÄ Paula – 1997, "Distribution, morphology and structure of sea ice pressure ridges in the Baltic Sea", *Fennia*, 175:2, pp. 139-240

KAUKIAINEN Yrjö – 1993, *A history of Finnish shipping*, New York, Routledge, 231 p.

KEEVALLIK Sirje, TOOMING Heino – 1996, "Relationships between surface albedo and spring heat accumulation", *Tellus*, 48A, pp. 727-732

KEINONEN Arno – 1978, "Presentation of sea ice ridges in general and physical characteristics of Baltic Ridges for ship resistance calculations", *Winter Navigation Research Board*, Research Report n°24, 19 p.

KERGOMARD Claude, dir. BIAYS Pierre – 1982, *Recherches sur les climats océaniques du secteur arctique européen et leur variabilité : températures, circulation atmosphérique et glaces marines*, Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Techniques de Lille, 241 p. + 163 p.

KERGOMARD Claude – 1983, "Les interrelations entre climat et extension des glaces marines: un problème essentiel de la climatologie arctique", *Physio-Géo*, n°8, pp. 1-30

⁵³ À propos des conditions de glace de la Mer Baltique sur les côtes de Finlande

KERGOMARD Claude – 1985, "La variabilité climatique et l'influence des glaces marines : l'exemple de l'Ile aux Ours", *Physio-Géo*, n°12, pp. 11-17

KERGOMARD Claude – 1990, "La variabilité spatio-temporelle de l'englacement des mers arctiques européennes : une approche quantitative", *Inter-Nord*, n°19, pp. 53-62

KERGOMARD Claude – 2007, "L'Arctique face au changement climatique", *Annales de géographie*, n°653, pp.3-22

KOSLOWSKI Gerhard, GLASER Rüdiger – 1995, "Reconstruction of the ice winter severity since 1701 in the Western Baltic", *Climatic change*, 31, pp. 79-98

KOSLOWSKI Gerhard, GLASER Rüdiger – 1999, "Variations in reconstructed ice winter severity in the Western Baltic from 1501 to 1995, and their implications for the North Atlantic Oscillation", *Climatic Change*, 41, pp. 175-191

KORHONEN Johanna – 2006, "Long-term changes in lake ice cover in Finland", *Nordic Hydrology*, 37, n°4-5, pp. 347-363

KORHONEN Johanna – 2007, "Hydrologinen vuosikirja 2001-2005; Hydrological Yearbook 2001-2005", *Suomen Ympäristö*, 44, 216 p.

KOTOVIRTA Ville, JALONEN Risto, AXELL Lars, RISKKA Kaj, BERGLUND Robin – 2009, "A system for route optimization in ice-covered waters", *Cold regions science and technology*, 55, pp. 52-62

KOUABENAN Dongo Rémi – 2009, "Role of beliefs in accident and risk analysis and prevention", *Safety Science*, 47, pp. 767-776

KOVÁCS Gyöngyi, SPENS Karen M. – 2006, "Transport infrastructure in the Baltic States post-EU succession", *Journal of transport geography*, 14, pp. 426-436

KRAUS Eric B., BUSINGER Joost A. – 1994, *Atmosphere – ocean interaction*, Oxford, Oxford University Press, 362 p.

KUBAT Ivana, GORMAN Robert, COLLINS Anne, TIMCO Garry – 2007, "Climate change impact on Canadian Northern Shipping regulations", *Marine Technology*, 44, n°4, pp. 245-253

KULLENBERG Gunnar – 1981, "Physical oceanography" in A. Voipio (ed.) : *The Baltic Sea*, Amsterdam, Elsevier oceanographic series, pp. 135-181

KUUSISTO Esko – 1994, "The thickness and volume of lake ice in Finland", *Publications of the Water and Environment Research Institute*, 17, pp. 27-36

KUUSISTO Esko – 2005a, "Lake district of Finland" in the M. Seppälä (ed.) : *Physical geography of Fennoscandia*, Oxford, Oxford University Press, pp. 283-296

KUUSISTO Esko – 2005b, "Snow as a geographic element" in the M. Seppälä (ed.) : *Physical geography of Fennoscandia*, Oxford, Oxford University Press, pp. 159-174

LAAKSONEN Kyösti – 1976, "Seasonal variations in the influence of the seas and inland waters upon mean air temperatures in Fennoscandia (1921-1950)", *Annales academiae scientiarum fennicae*, Series A, III, 121, 33 p.

LAGEAT Yannick – 2004, "Géomorphologie et gestion des littoraux", *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, n°3, pp. 360-370

- LAGEAT Yannick** – 2006, "Compte-rendu bibliographique de M-F. André : *Le monde polaire*", Norois, n°198/1, pp. 84-87
- LAINE Vesa, HEIKINHEIMO Martti** – 1996, "Estimation of surface albedo from NOAA AVHRR data in high latitudes", *Tellus*, 48A, pp. 424-441
- LAMB Hubert** – 1977, *Climate, present, past and future, Volume 2, Climatic history and future*, London, Methuen & Co Ltd, 835 p.
- LANDTMAN Christian** – 1983, *The development and future of operation in ice and of icebreaking research*, Helsinki, Seventh international conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, 36 p.
- LATVIJAS INSTITŪTS** – 2001, *The Latvians a seafaring nation*, Riga, Latvijas Institūts, 24 p.
- LEDLEY Tamara Shapiro** – 1993, "Sea ice : a factor in influencing climate in short and long time scales" in *Ice in the climate system*, NATO ASI Series, Vol. 112, Berlin, Springer-Verlag, pp. 533 - 555
- LEPPÄRANTA Matti** – 1993, "The Baltic Sea ice climate : an introduction", *Report series in geophysics*, n°27, pp. 5-16
- LEPPÄRANTA Matti** – 2007, "History of Baltic Sea Ice Climate Workshops", *Berichte des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie*, n°42, pp. 15-21
- LEPPÄRANTA Matti, LENSU Mikko** (ed.) – 1992, ERS-1 Baltic Sea ice calibration/validation, post-experiment report/PIPOR/Finland, Internal report 1992 (9), *Finnish Institute of Marine Research*, 69 p.
- LEPPÄRANTA Matti, MAKKONEN Lasse, PALOSUO Erkki, KUUSISTO Esko** – 2001, "Geophysics of snow and ice in Finland during the 1900s", *Geophysica*, 32 (1-2), pp. 261-285
- LEPPÄRANTA Matti, SEINÄ Ari** – 1985, "Freezing, maximum annual ice thickness and breakup of ice on the Finnish coast during 1830-1984", *Geophysica*, 21, n°2, pp. 87-104
- LEPPÄRANTA Matti, SUN Yan, HAAPALA Jari** – 1998, "Comparisons of sea-ice velocity fields from ERS- SAR and a dynamic model", *Journal of Glaciology*, 44, n°147, pp. 248-262
- LEPPÄRANTA Matti, THOMPSON Thomas** – 1989, "BEPERS-88 Sea ice remote sensing with synthetic aperture radar in the Baltic Sea", *Eos*, 70, n°28, pp. 698-709
- LEPPÄRANTA Matti, TIKKANEN Matti, SHEMEIKKA Petri** – 1998, "Observations of ice and its sediments on the Baltic Sea coast", *Nordic Hydrology*, 29, pp. 199-220
- LÉPY Élise**, dir. COUDÉ Armel – 2003, *La prise en glace saisonnière des eaux des littoraux et de la mer côtière des Golfs de Botnie, de Finlande et de Riga. Processus climato-maritimes et implications sociétales*, Mémoire de DEA, Université de Caen – Basse-Normandie, 88 p.
- LÉPY Élise** – 2007, "Influence of the temperature on ice conditions in the Bay of Bothnia", *Berichte des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie*, n°42, pp. 23-28
- LÉPY Élise** – 2008, "Information and communication technologies, a tool for risk prevention and accident management on sea ice. The case of the Bay of Bothnia (Baltic Sea)", *NetCom*, 22, n°3-4, pp. 255-264

LE TIXERANT Matthieu, PENNANGUER Stéphane, BONCOEUR Jean, CURTIL Olivier – 2005, "Approche spatiale de la réglementation des pêches professionnelles dans la bande côtière" in *F. Gourmelon et M. Robin (ed.) : SIG et littoral*, Paris, Hermès, pp. 127-144

LIDMAR-BERGSTRÖM Karna, NÄSLUND Jens-Ove – 2005, "Major landforms and bedrock" in *M. Seppälä (ed.) : The physical geography of Fennoscandia*, Oxford, Oxford University Press, pp. 3-16

LOHEZ Marc – 2001, "Un technopole arctique : Oulu (Finlande), fief de Nokia", *Les actes du FIG 2001*

LUNQVIST Jan-Eric – 2003, "The development of the Swedish Ice Service during last 40 years", *SMHI*, n°72, pp. 37-41

LUNDQVIST Jan-Eric, BERGQUIST Ilona – 2000, *A summary of the ice season and icebreaking activities 1999/2000*, Sjöfartsverket, Swedish Meteorological and Hydrological Institute, 47 p.

MAGNUS Olaus – 2004, *Histoire et description des peuples du Nord*, Paris, Les Belles Lettres, 376 p.

MAGNUS Olaus, BALZAMO Elena – 2005, *Carta Marina*, Paris, Corti, 187 p.

MÄLKKI Pentti, TAMSALU Rein – 1985, "Physical features of the Baltic Sea", *Finnish Marine Research*, n°252, 110 p.

MALTE-BRUN Conrad – 1833, *Précis de la géographie universelle ou description de toutes les parties du monde – Tome sixième – Europe orientale, Peuples slaves*, Paris, Aimé André Éditeur, 777 p.

MANSIKKANIEMI Hannu – 1976, "Ice action on the seashore, southern Finland : observations and experiments", *Fennia*, 148, pp. 1-17

MARITIME ADMINISTRATION OF LATVIA – 2002, *Pilot of Baltic Sea - Latvian coast*, Rīga, 181 p.

MARKHAM W. E. – 1986, "The ice cover" in *P. Martini (ed.) : Canadian inland seas*, Amsterdam, Elsevier, pp. 101-116

MARTINI Ireneo Peter – 1986, "Coastal features of canadian inland seas" in *P. Martini (ed.) : Canadian inland seas*, Amsterdam, Elsevier, pp. 117-142

MATCZAK Maciej, OLDAKOWSKI Bogdan, GRZELAKOWSKI Andrzej, URBAS Krzysztof, BLUS Marek – 2006, "Traffic flows between the Baltic Ports and other major European Ports", *Port-Net*, 03-2, 76 p.

MC BEAN Gordon, ALEKSEEV Genrikh, CHEN Deliang, FØRLAND Eirik, FYFE John, GROISMAN Pavel Y., KING Roger, MELLING Humfrey, VOSE Russell, WHITFIELD Paul H. – 2005, "Arctic climate : past and present" in *Arctic Climate Impact Assessment Scientific Report*, New York, Cambridge University Press, pp. 21-60

MEIER H. E. Markus, DÖSCHER Ralf, HALKKA Antti – 2004, "Simulated distributions of Baltic sea-ice in warming climate and consequences for winter habitat of the Baltic ringed seal", *Ambio*, vol. 33, n°4 – 5, pp. 249-256

MELLING Humfrey – 2002, "Sea ice of the Northern Canadian Arctic Archipelago", *Journal of geophysical research*, 107, C11, pp. 3181-3202

MERCIER Denis – 2003, "Les géographes français et les milieux polaires et subpolaires", *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, n°4, pp. 407-416

- MEUR-FEREC Catherine**, dir. MIOSSEC Alain – 2006, *De la dynamique naturelle à la gestion intégrée de l'espace littoral : un itinéraire de géographe*, Volume 1, Habilitation à Diriger des Recherches, Université du Littoral Côte d'Opale, 247 p.
- MIETTINEN Arto, JANSSON Henrik, ALENIOUS Teija, HAGGREN Georg** – 2007, "Late Holocene sea-level changes along the southern coast of Finland, Baltic Sea", *Marine Geology*, 242, pp. 27-38
- MIKELSONE Inese**, dir. KOSTJUKOVŠ Jānis – 2003, *Ledus apstākli Baltijas Jūras Latvijas piekrastē 19.-20. gadsimtā*⁵⁴, Mémoire de Licence, Université de Lettonie, 56 p.
- MIOSSEC Alain** – 1998, *Les littoraux entre nature et aménagement*, Paris, Sedes, 192 p.
- MOIGN Annik**, dir. GUILCHER André – 1973, *Strandflats immergés et émergés du Spitsberg central et nord-occidental*, Thèse d'État, Université de Bretagne Occidentale, 692 p.
- MOIGN Annik** – 1976, "L'action des glaces flottantes sur le littoral et les fonds marins du Spitsberg central et Nord-occidental", *Revue de géographie de Montréal*, XXX, n°1-2, pp. 51-64
- MOILANEN Pentti, SAVOLAINEN Riitta, AHVONEN Anssi** – 2005, "The losses in the Finnish aquaculture caused by seals in 2003", *Symposium on biology and management of seals in the Baltic area, 15-18 February 2005, Helsinki*, pp. 40-42
- MORALES MAQUEDA Miguel A.** – 2004, "Polynya dynamics: a review of observations and modeling", *Review of Geophysics*, 42, RG1004, 37 p.
- MOREL Valérie, DEBOUDT Philippe, HELLEQUIN Anne-Peggy, HERBERT Vincent, MEUR-FEREC Catherine** – 2006, "Regard rétrospectif sur l'étude des risques en géographie à partir des publications universitaires (1980-2004)", *L'information géographique*, n°1, pp. 6-24
- MUSIELAK Stanislaw, FURMANCZYK Kazimierz, HÅKANSON Lars, JONSSON Per, PERSSON Johan** – 2004, "The Baltic Sea and its coasts" in *Sustainable water management in the Baltic Sea basin*, Uppsala, Baltic University Programme Publication, pp. 29-38
- NATIONAL BOARD OF WATERS, HYDROLOGICAL OFFICE** – 1983, *Virtaaman havaintopaikat, Discharge stations 1982*, Document cartographique
- NIELSEN Niels** – 1988, "Observations of sea ice influence on the littoral sediment exchange, North Zealand, Denmark", *Geografisk Tidsskrift*, 88, pp. 61-67
- NYLANDER EIIJA** – 2006, *Kalatalous tilastoina 2006. Finnish fisheries statistics*, Helsinki, Finnish game and fisheries research institute, 31 p.
- OLTEDAL Sigve, MOEN Bjørg-Elin, KLEMPE Hroar, RUNDMO Torbjørn** – 2004, "Explaining risk perception. An evaluation of cultural theory", *Rotunde*, n°85, 40 p.
- OMSTEDT Anders** – 2003, "Some aspects of the Baltic Sea ocean climate system", *SMHI*, n°72, pp. 43-48
- OMSTEDT Anders, CHEN Deliang** – 2001, "Influence of atmospheric circulation on the maximum ice extent in the Baltic Sea", *Journal of Geophysical Research*, 106, C3, pp. 4493-4500.
- OMSTEDT Anders, HANSSON Daniel** – 2006, "The Baltic Sea ocean climate system memory and response to changes in the water and heat balance components", *Continental Shelf Research*, 26, pp. 236-251

⁵⁴ Les conditions glacielles des côtes lettones de la Mer Baltique au XIX^{ème} et XX^{ème} siècle

OMSTEDT Anders, NYBERG Leif – 1996, "Response of Baltic Sea ice to seasonal, interannual forcing and climate change", *Tellus*, 48A, pp. 644-662

OMSTEDT Anders, PETTERSEN Christin, RODHE Johan, WINSOR Peter – 2004, "Baltic Sea climate : 200 yr of data on air temperature, sea level variation, ice cover, and atmospheric circulation", *Climate Research*, 25, pp. 205-216

ORCIER Pascal – 2005, "Effets frontières, recompositions et reconnections dans l'espace baltique", http://www.cafe-geo.net/article.php?id_article=720

OUTHIER Réginald – 1744, *Journal d'un voyage au Nord en 1736 et 1737*, Paris, Piget et Durand, 240 p.

OVERLAND James E. – 1998, "Arctic meteorology and air/ice coupling" in *M. Leppäranta (ed.) : Physics of ice-covered seas, vol.2*, Helsinki, University of Helsinki, pp. 775-786

PAGNEY Pierre – 1970, *Les climats polaires*, Paris, Centre de Documentation Universitaire, 91 p.

PAGNEY Pierre – 1989, "Les climats côtiers de la Mer Baltique", *Hommes et Terres du Nord*, n°3, pp. 167-170

PALOSUO Erkki – 1953, *A treatise on severe ice conditions in the Central Baltic*, Thèse de Doctorat, Université d'Helsinki, 130 p.

PALOSUO Erkki – 1961, "Crystal structure of brackish and fresh-water ice", *Snow and ice commission* 54, pp. 9-14

PAN Huachen, ERANTI Esa – 2009, "Flow and heat transfer simulations for the design of the Helsinki Vuosaari harbour ice control system", *Cold regions science and technology*, 55, n°3, pp. 304-310

PASKOFF Roland – 1981, *L'érosion des côtes*, Paris, PUF, 126 p.

PASKOFF Roland – 1998, *Les littoraux, Impact des aménagements sur leur évolution*, Paris, Armand Colin, 260 p.

PASKOFF Roland, VERGER Fernand – 1999, "Une tendance actuelle de la géographie des littoraux", *Revue de Géographie de Lyon*, 74-1, pp. 3-6

PELLETIER B.R. – 1986, "Seafloor morphology and sediments" in *P. Martini (ed.) : Canadian inland seas*, Amsterdam, Elsevier, pp. 143-162

PHILIP Arne L. – 1990, "Ice-pushed boulders on the shores of Gotland, Sweden", *Journal of Coastal Research*, 6, 3, pp. 661-676

PIRAZZINI Roberta, VIHMA Timo, GRANSKOG Mats, CHENG Bin – 2006, "Surface albedo measurements over sea ice in the Baltic Sea during the spring snowmelt period", *Annals of Glaciology*, 44, pp. 7-14

PLANCHON Olivier, dir. LAMARRE Denis – 1997, *Les climats maritimes dans le monde*, Thèse de Doctorat, Villeneuve d'Ascq, Presses Universitaires du Septentrion, 233 p.

PORT OF OULU – 2008, *Annual report 2007*, 23 p.

PRINSENBERG Simon – 1986, "Salinity and temperature distributions of Hudson Bay and James Bay" in *P. Martini (ed.) : Canadian inland seas*, Amsterdam, Elsevier, pp. 163-186

PROGRAMME DES NATIONS-UNIES POUR L'ENVIRONNEMENT – 2000, *L'avenir de l'environnement mondial 2000*, Bruxelles, De Boeck Université, 398 p.

PYÖKÄRI Mauri – 1978, "Transportation of shore stones by ice in the Airisto area, SW Finland, Winter 1975/76", *Publicationes Instituti Geographici Universitatis Turkuensis*, 84, 17 p.

RÄISÄNEN Jouni, HANSSON Ulf, ULLERSTIG Anders, DÖSCHER Ralf, GRAHAM Phil, JONES Colin, MEIER Markus, SAMUELSSON Patrick, WILLÉN Ulrika – 2004, "European climate in the late twenty-first century : regional simulations with two driving global models and two forcing scenarios", *Climate dynamics*, 22, pp. 13-31

RECLUS Élisée – 1885, *Nouvelle géographie universelle : la Terre et les hommes – V – L'Europe scandinave et russe*, Paris, Hachette et Cie, 944 p.

RISKA Kaj, WILHELMSON Max, ENGLUND Kim, LEIVISKÄ Topi – 1998, "Performance of merchant vessels in ice in the Baltic", *Winter navigation research board*, n°52, 73 p.

ROUSSEL Isabelle – 1983, "Un aperçu sur l'intérêt climatique de la Mer Baltique", *Physio-Géo*, n°8, pp. 47-51

ROUSSEL Isabelle, dir. **PAGNEY Pierre** – 1987, *Recherches sur les climats côtiers de la Mer Baltique*, Thèse d'État, Université Paris - Sorbonne, 1015 p.

ROUSSEL Isabelle – 1989, "La chaîne des Scandes : une barrière climatique ?", *Hommes et Terres du Nord*, n°3, pp.161-166

SALMI Pekka, SEPPÄNEN Eila, AHVONEN Anssi – 2005, "Commercial fishermen's conceptions about protection areas for seals", *Symposium on biology and management of seals in the Baltic area, 15-18 February 2005, Helsinki*, pp. 45-47

SCHRUM Corinna, BACKHAUS Jan O. – 1999, "Sensitivity of atmosphere – ocean heat exchange and heat content in the North Sea and the Baltic Sea", *Tellus*, 51 A, pp. 526-549

SCHRUM Corinna, JANSSEN Franck – 2003, "Decadal variability in Baltic Sea ice development analysis of model results and observations", *SMHI*, n°72, pp. 49-58

SEINÄ Ari – 1993, "Ice time series of the Baltic Sea", *Report series in geophysics*, n°27, pp. 87-90

SEINÄ Ari, ERIKSSON Patrick, KALLIOSAARI Simo, VAINIO Jouni – 2006, "Ice seasons 2001 – 2005 in Finnish sea areas – Jäätalvet 2001 – 2005 suomen merialueilla", *Meri*, n°57, 94 p.

SEINÄ Ari, ERÖNVALL Hannu, KALLIOSAARI Simo, VAINIO Jouni – 2001, "Ice seasons 1996 – 2000 in Finnish sea areas – Jäätalvet 1996-2000 suomen merialueilla", *Meri*, n°43, pp.3-98

SEINÄ Ari, PELTOLA J. – 1991, "Duration of the ice season and statistics of fast ice thickness along the Finnish Coast 1961-1990", *Finnish Marine Research*, 258, pp. 3-46

SEINÄ Ari, PALOSUO Erkki – 1996, "The classification of the maximum annual extent of ice cover in the Baltic Sea 1720-1995", *Meri*, 27, pp. 79-91

SERRY Arnaud – 2005, "Les ports de la Baltique orientale. Persistances des territoires et mutations", *Le courrier des pays de l'Est*, n° 1048, pp. 40-50

SERRY Arnaud, dir. **THOREZ Pierre** – 2006, *La réorganisation portuaire de la Baltique orientale – L'émergence d'une nouvelle région en Europe*, Thèse de Doctorat, Université du Havre, 373 p.

SHILTS William – 1986, "Glaciation of the Hudson Bay region" in *P. Martini (ed.) : Canadian inland seas*, Amsterdam, Elsevier, pp. 55-78

SHIRASAWA Kunio, ISHIKAWA Masao, TAKATSUKA Toru, MAEKAWA Kimihiko – 2005, "Sea ice conditions, and meteorological and oceanographic observations at Saroma-ko Lagoon, Hokkaido, November 2003 – September 2004", *Low temperature science, Series A*, 63, pp. 34-49

SIIVONEN Oso – 1979, "The development of Finnish ice class rules" in *Ice, ships and winter navigation*, Board of Navigation, pp. 154-171

STÅLNACKE Per – 1996, "Nutrient loads to the Baltic Sea", *Linköping Studies in Arts and Sciences*, n° 146, Thèse de Doctorat, Université de Linköping, 188 p.

STAUDT Michael, KALLIO Hilka et SCHMIDT-THOMÉ Philipp – 2004, "Modelling a future sea level change scenario affecting the spatial development in the Baltic Sea Region – First results of the SEAREG project", *Coastline Reports 2*, pp. 195-199

STIGEBRANDT Anders, GUSTAFSSON Bo G. – 2003, "Response of the Baltic Sea to climate change – theory and observations", *Journal of sea research*, 49, pp. 243 - 256

STRÜBING Klaus – 2007, "Some ideas on sea ice climate and navigation in the Baltic Sea", *Berichte des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie*, n°42, pp. 67-78

SWEDISH MARITIME ADMINISTRATION – 2006, *OM Sjöfartsverket*, 13 p.

SWEDISH METEOROLOGICAL AND HYDROLOGICAL INSTITUTE – 1981, *The Baltic Sea ice code*, Norrköping, SMHI, 45p.

SWEDISH METEOROLOGICAL AND HYDROLOGICAL INSTITUTE, FINNISH INSTITUTE OF MARINE RESEARCH – 1982, *Climatological ice atlas for the Baltic Sea, Kattegat, Skagerrak and Lake Vänern (1963-1979)*, Norrköping, 220 p.

TABEAUD Martine – 2002, "Les variabilités historiques du climat en Europe", *Biogeographica*, 78, n°4, pp. 149-157

TABEAUD Martine – 2008, *La climatologie générale*, Paris, Armand Colin, 127 p.

TABEAUD Martine, KERGOMARD Claude – 1990, "Quelques remarques sur les interrelations climat / océan à petite échelle", *Annales de géographie*, n°553, pp. 291-304

TACIS – 1998, *Exploring and future shipping through the Baltic Sea*, DG 1A, 83 p.

TAURISANO ANDREA, BØGGILD CARL EGEDE, KARLSEN HÅKON GJESSING – 2004, "A century of climate variability and climate gradients from coast to ice sheet in west Greenland", *Geografiska Annaler*, 86 A, pp. 217-224

TERHO Lasse – 1979, "Winter navigation and the Finnish ports" in *Ice, ships and winter navigation*, Board of Navigation, pp. 333-348

THOMPSON Thomas, LEPPÄRANTA Matti (ed.) – 1987, "BEPERS-88 Experiment plan", *Winter Navigation Research Board*, n°46, 56 p.

THOREZ Pierre – 1998, "Les transports maritimes dans les États issus de l'URSS", *Le courrier des Pays de l'Est*, n°426, pp. 18-52

- THOREZ Pierre** – 2008, "La Route maritime du Nord. Les promesses d'une seconde vie", *Le courrier des Pays de l'Est*, n°1066, pp. 48-59
- THOREZ Pierre** – à paraître, "Les enjeux portuaires de la Russie en Mer Baltique"
- TIKKANEN Matti** – 2005, "Climate" in M. Seppälä (ed.) : *The physical geography of Fennoscandia*, Oxford, Oxford University Press, pp. 97-112
- TIKKANEN Matti, OKSANEN Juha** – 2002, "Late Weichselian and Holocene shore displacement history of the Baltic Sea in Finland", *Fennia*, 180 : 1-2, pp. 9-20
- TINZ Birger** – 1996, "On the relation between annual maximum extent of ice cover in the Baltic Sea and sea level pressure as well as air temperature field", *Geophysica*, 32 (3), pp. 319-341
- TIURI Martti, HALLIKAINEN Martti, LÄÄPERI Antti** – 1978, "Radiometer studies of low-salinity sea ice", *Boundary-Layer Meteorology*, 13, pp. 361-371
- TOURRE Yves** – 2002, "L'Oscillation Nord Atlantique et l'Oscillation Arctique", *La Lettre de Médias* n°13, pp. 8-10
- TREMBLAY Germain** – 1967, "Observations et mesures sur les blocs glaciels du cap à l'Orignal", *Cahiers de Géographie du Québec*, 11 (23), pp. 402-411
- TROUILLET Brice**, dir. CORLAY Jean-Pierre – 2004, *La «mer côtière» d'Iroise à Finistère – Étude géographique d'ensembles territoriaux en construction*, Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 293 p.
- TSINKER Gregory** (ed.) – 2004, *Port engineering : planning, construction, maintenance, and security*, Hoboken, Wiley and Sons, 896 p.
- UKKONEN Pirkko** – 2002, "The early history of seals in the Northern Baltic", *Annales zoologici fennici*, 39, pp. 187 – 207
- UOTILA Juha** – 2001, "Observed and modelled sea-ice drift response to wind forcing in the northern Baltic Sea", *Tellus*, 53A, pp. 112-128
- VAPALAHTI Hannu** – 1994, *Suomen kuvitettu laivaluettelo – Finnish Illustrated List of ships*, Tampere, Vapalahti, 272 p.
- VARSTA Pietr** – 1977, "Measurement and analysis of ice-induced stresses in the shell of an icebreaker", *Winter Navigation Research Board*, Research Report n°21, 28 p.
- VAUGHAN Elaine, NORDENSTAM Brenda** – 1991, "The perception of environmental risks among ethnically diverse groups", *Journal of cross-cultural psychology*, 22, n°1, pp. 29-60
- VERGER Fernand** – 1993, "Perception géométrique du littoral", *Mappemonde*, 1/93, pp. 2-3
- VEYRET Yvette** (ed.) – 2003, *Les risques*, Paris, Sedes, 255 p.
- VEYRET Yvette** (ed.) – 2004, *Les risques*, Rosny-sous-Bois, Bréal, 205 p.
- VIHMA Timo, BRÜMMER Burghard** – 2002, "Observations and modelling of the on-ice and off-ice air flow over the Northern Baltic Sea", *Boundary-Layer Meteorology*, 103, pp. 1-27
- VIHMA Timo, HAAPALA Jari** – 2003, "Sea ice" in D. Jacob et A. Omstedt (ed.) : *BALTEX Phase I, 1993-2003 State of the art report*, pp. 32-58

VIHMA Timo, HAAPALA Jari – 2009, "Geophysics of sea ice in the Baltic Sea : a review", *Progress in oceanography*, 80, pp. 129-148

WALSH John E., JOHNSON Claudia M. – 1979, "Interannual atmospheric variability and associated fluctuations in Arctic Sea ice extent", *Journal of Geophysical Research*, 84, C11, pp. 6915 - 6928

WEEKS W. F. – 1998, "On the history of research on sea ice" in *M. Leppäranta (ed.) : Physics of ice-covered seas, vol.1*, Helsinki, University of Helsinki, pp. 1-24

WEHR Tobias, ATTEMA Evert – 2001, "Geophysical validation of Envisat data products", *Advances in Space Research*, 28, n°1, pp.83-91

WINTERHALTER Boris, FLODÉN Tom, IGNATIUS Heikki, AXBERG Stefan, NIEMISTÖ Lauri – 1981, "Geology of the Baltic Sea" in *A. Voipio (ed.) : The Baltic Sea*, Amsterdam, Elsevier oceanographic series, pp. 1-121

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION – 1970, *WMO Sea ice nomenclature. Nomenclature OMM des glaces en mer*, Genève, Secretariat of the World Meteorological Organization

ZIMMERMANN Maurice, sous la direction de VIDAL DE LA BLACHE Paul et GALLOIS Lucien – 1933, *Géographie universelle – Tome III - États scandinaves, Régions polaires boréales*, Paris, Armand Colin, 328 p.

РУДОВИЦЬ Л. – 1918, *Ледяной покровъ. Рижскаго залива*⁵⁵, Петроградъ, Типография Морского Комиссариата, въ Главномъ Адмиралтействѣ, 64 p.

Государственный комитет СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды – 1985, *Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР, Том 1 : Балтийское море*⁵⁶, Ленинград, Гидрометеороиздат, 80 p.

⁵⁵ La couverture de glace. Golfe de Riga

⁵⁶ Les conditions hydrométéorologiques dans les zones maritimes de l'URSS, Tome 1 : la Mer Baltique

Références des séries de données et des sites internet

LES CONDITIONS CLIMATIQUES ET METEOROLOGIQUES

Finlande :

La Société des Sciences de Finlande, *Observations météorologiques*, Helsingfors, 1873-1880

Institut Météorologique Central de la Société des Sciences de Finlande, *Observations météorologiques*, O.W Backman, Kuopio, 1881-1900

Meteorologischen Zentralanstalt, *Meteorologisches Jahrbuch für Finland*, Helsingfors, 1901-1915

Ilmatieteellinen Keskuslaitos, *Kuukausikatsaus suomen sääoloihin*, 1957-2007

Lettonie :

Meteorologische Beobachtungen, 1853-1868 neuen Styls

Таблица метеорологических наблюдений – Meteorologische beobachtungs-tabelle, 1870-1879

Прибалтийская Метеорологическая Стъ, *Таблица метеорологических наблюдений*, 1921

Latvijas meteoroloģisko staciju tīkls, *Meteoroloģisko novērojumu tabula*, 1921, 1944

Стъ метеорологических станций Главной Физической Обсерватории, *Таблица метеорологических наблюдений*, 1922

Valsts Meteoroloģisko Staciju Tīkls, *Meteoroloģisko novērojumu tabele*, 1931-1940

PSRS galvenā hidrometeoroloģiskā dienesta pārvalde pie PSR Savienības TKP, Latvijas HMD Pārvalde, *Meteoroloģisko novērojumu tabele*, 1941-1943

Главное управление гидрометеорологической службы при совете министров СССР, Управление гидрометеорологической службы Латвийское, *Таблица метеорологических наблюдений*, 1949-71

Государственный комитет СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды УГКС Латвийской ССР, *Таблица метеорологических наблюдений*, 1971-1992

Latvijas Republikas HMP, *Meteoroloģisko novērojumu tabula*, 1992-2005

LES CONDITIONS GLACIELLES MARINES

Finlande :

PALMÉN E. – 1928, " Yleiskatsaus talven 1918-19 jääsuhteisiin ", *Merentutkimuslaitoksen Julkaisu*, n°57, 37 p.

JURVA Risto – 1944, "Yleiskatsaus talven 1921-22 jääoloihin", *Merentutkimuslaitoksen Julkaisu*, n°116, 45 p.

_____ – 1944, "Yleiskatsaus talven 1923-24 jääoloihin", *Merentutkimuslaitoksen Julkaisu*, n°117, 44 p.

_____ – 1941, "Yleiskatsaus talven 1925-26 jääoloihin", *Merentutkimuslaitoksen Julkaisu*, n°115, 55 p.

GRANQVIST Gunnar – 1928, " Yleiskatsaus talven 1926-27 jääsuhteisiin ", *Merentutkimuslaitoksen Julkaisu*, n°55, 52 p.

_____ – 1928, " Yleiskatsaus talven 1927-28 jääsuhteisiin ", *Merentutkimuslaitoksen Julkaisu*, n°56, 56 p.

_____ – 1929, " Yleiskatsaus talven 1928-29 jääsuhteisiin ", *Merentutkimuslaitoksen Julkaisu*, n°64, 48 p.

_____ – 1930, " Yleiskatsaus talven 1929-30 jääsuhteisiin ", *Merentutkimuslaitoksen Julkaisu*, n°71, 33 p.

_____ – 1931, " Yleiskatsaus talven 1930-31 jääsuhteisiin ", *Merentutkimuslaitoksen Julkaisu*, n°79, 54 p.

_____ – 1932, " Yleiskatsaus talven 1931-32 jääsuhteisiin ", *Merentutkimuslaitoksen Julkaisu*, n°85, 52 p.

_____ – 1933, "Översikt av isarna vintern 1932-33", *Merentutkimuslaitoksen Julkaisu*, n°87, 42 p.

JURVA Risto – 1935, "Yleiskatsaus talven 1933-34 jääsuhteisiin", *Merentutkimuslaitoksen Julkaisu*, n°97, 71 p.

_____ – 1936, "Yleiskatsaus talven 1934-35 jääsuhteisiin", *Merentutkimuslaitoksen Julkaisu*, n°102, 65 p.

GRANQVIST Gunnar – 1936, "Yleiskatsaus talven 1935-36 jääsuhteisiin", *Merentutkimuslaitoksen Julkaisu*, n°108, 47 p.

JURVA Risto – 1948, "Yleiskatsaus talven 1936-37 jääsuhteisiin", *Merentutkimuslaitoksen Julkaisu*, n°113, 71 p.

JURVA Risto, PALOSUO Erkki – 1959, "Die Eisverhältnisse in den Finnland umgebenden Meeren in den Wintern 1938-45 und die Baltischen Eiswochen in den Wintern 1938-39", *Merentutkimuslaitoksen Julkaisu*, n°188, 69 p.

SIMOJOKI Heikki – 1952, "Die Eisverhältnisse in den Finnland umgebenden Meeren in den Wintern 1946-50", *Merentutkimuslaitoksen Julkaisu*, n°154, 88 p.

_____ – 1956, "Die Eisverhältnisse in den Finnland umgebenden Meeren in den Wintern 1951-55", *Merentutkimuslaitoksen Julkaisu*, n°171, 23 p.

PALOSUO Erkki – 1957, "Die Eisverhältnisse in den Finnland umgebenden Meeren im Winter 1955-56", *Merentutkimuslaitoksen Julkaisu*, n°174, 14 p.

_____ – 1958, "Die Eisverhältnisse in den Finnland umgebenden Meeren im Winter 1956-57", *Merentutkimuslaitoksen Julkaisu*, n°178, 24 p.

_____ – 1959, "Die Eisverhältnisse in den Finnland umgebenden Meeren im Winter 1957-58", *Merentutkimuslaitoksen Julkaisu*, n°187, 22 p.

_____ - 1960, "Jäätalvi 1958/59 suomen merialueilla - Ice winter 1958/59 along the Finnish coast", *Merentutkimuslaitoksen Julkaisu*, n°191, 18 p.

_____ - 1961, "Jäätalvi 1959/60 suomen merialueilla - Ice winter 1959/60 along the Finnish coast", *Merentutkimuslaitoksen Julkaisu*, n°196, 22 p.

_____ - 1961, "Jäätalvi 1960/61 suomen merialueilla - Ice winter 1960/61 along the Finnish coast", *Merentutkimuslaitoksen Julkaisu*, n°200, 28 p.

_____ - 1962, "Jäätalvi 1961/62 suomen merialueilla - Ice winter 1961/62 along the Finnish coast", *Merentutkimuslaitoksen Julkaisu*, n°206, 24 p.

_____ - 1964, "Jäätalvi 1962/63 suomen merialueilla - Ice winter 1962/63 along the Finnish coast", *Merentutkimuslaitoksen Julkaisu*, n°213, 28 p.

_____ - 1965, "Jäätalvi 1963/64 suomen merialueilla - Ice winter 1963/64 along the Finnish coast", *Merentutkimuslaitoksen Julkaisu*, n°217, 24 p.

_____ - 1966, "Jäätalvi 1964/65 suomen merialueilla - Ice winter 1964/65 along the Finnish coast", *Merentutkimuslaitoksen Julkaisu*, n°220, 20 p.

_____ - 1971, "Jäätalvet 1966-70 suomen merialueilla - Ice winters 1966-70 along the Finnish coast", *Merentutkimuslaitoksen Julkaisu*, n°234, 63 p.

KALLIOSAARI Simo - 1978, "Jäätalvet 1971-75 suomen merialueilla - Ice winters 1971-75 along the Finnish coast", *Finnish Marine Research*, n°245, 63 p.

_____ - 1982, "Jäätalvet 1976-80 suomen merialueilla - Ice winters 1976-80 along the Finnish coast", *Finnish Marine Research*, n°249, pp.3-61

_____, **SEINÄ Ari** - 1987, "Jäätalvet 1981-1985 suomen merialueilla - Ice winters 1981 - 1985 along the Finnish coast", *Finnish Marine Research*, n°254, pp.1-63

SEINÄ Ari, KALLIOSAARI Simo - 1991, "Jäätalvet 1986-90 suomen merialueilla - Ice winters 1986-90 along the Finnish coast", *Finnish Marine Research*, n°259, pp.3-61

SEINÄ Ari, ERÖNVALL Hannu, KALLIOSAARI Simo, VAINIO Jouni - 1996, "Ice seasons 1991 - 1995 in Finnish sea areas - Jäätalvet 1991-1995 suomen merialueilla", *Meri*, n°27, pp.3-77

_____ - 2001, "Ice seasons 1996 - 2000 in Finnish sea areas - Jäätalvet 1996-2000 suomen merialueilla", *Meri*, n°43, pp.3-98

SEINÄ Ari, ERIKSSON Patrick, KALLIOSAARI Simo, VAINIO Jouni - 2006, "Ice seasons 2001 - 2005 in Finnish sea areas - Jäätalvet 2001-2005 suomen merialueilla", *Meri*, n°57, 94 p.

_____ - 2006, "Ice seasons 2001 - 2005 in Finnish sea areas - Jäätalvet 2001 - 2005 suomen merialueilla", *Meri*, n°57, 94 p.

Suède:

ÖSTMAN C. J. - 1937, "Isförhållandena vid Sveriges kuster under vintrarna 1870/71-1934/35", *Meddelanden från Statens Meteorologisk-Hydrografiska Anstalt*, Band 6, n°6

THORSLUND B. - 1966, "Isförhållanden I Svenska farvatten under normalperioden 1931-1960", *SMHI Serie Meteorologi*, Nr. 13, 36 p.

WESTRING Gustaf - 1993, "Isförhållanden I Svenska farvatten under normalperioden 1961-1990", *SMHI Oceanografi*, Nr. 59, 13 p.

Golfe de Riga :

JURNIECIBAS DEPARTAMENTA HIDROGRAFISKA NODALA (The Hydrographic Section of the Latvian Marine Department, Riga), 1937, Ledus apstākli Latvijas piekrastē 1936 / 1937 g. ziemā

(Sea-Ice Conditions at the Coast of Latvia during the winter 1936/37), Rīgā, Jūrnieceības departamenta izdevums, 19 p.

JURNIECIBAS DEPARTAMENTA HIDROGRAFISKA NODALA (The Hydrographic Section of the Latvian Marine Department, Riga), 1938, Ledus apstākļi Latvijas piekrastē 1937 / 1938 g. ziemā (Sea-Ice Conditions at the Coast of Latvia during the winter 1937/38), Rīgā, Jūrnieceības departamenta izdevums, 22 p.

JURNIECIBAS DEPARTAMENTA HIDROGRAFISKA NODALA (The Hydrographic Section of the Latvian Marine Department, Riga), 1939, Ledus apstākļi Latvijas piekrastē 1938 / 1939 g. ziemā (Sea-Ice Conditions at the Coast of Latvia during the winter 1938/39), Rīgā, Jūrnieceības departamenta izdevums, 17 p.

JURNIECIBAS DEPARTAMENTA HIDROGRAFISKA NODALA (Departement für Seewesen-Hydrologische Abteilung), 1942, *Ledus un kuģniecības apstākļi. Latvijas piekrastē 1940./41. un 1941./42. g. Ziemās* (Eis-und schiffahrtsverhältnisse. An der lettländischen Meeresküste in den Wintern 1940/41 und 1941/42.), Rīgā, Jūrnieceības Departamenta Hidrografiskā Nodaļa, 102 p.

LES COURS D'EAU ET LACS

NATIONAL BOARD OF WATERS – 1977, "Hydrologinen vuosikirja 1974-1975, Hydrological yearbook 1974-1975", *Publications of the water research institute*, 23, 195 p.

_____ – 1980, "Hydrologinen vuosikirja 1976-1977, Hydrological yearbook 1976-1977", *Publications of the water research institute*, 35, 193 p.

_____ – 1981, "Hydrologinen vuosikirja 1978-1979, Hydrological yearbook 1978-1979", *Publications of the water research institute*, 45, 205 p.

_____ – 1983, "Hydrologinen vuosikirja 80, Hydrological yearbook 1980", *Publications of the water research institute*, 53, 174 p.

LEPPÄJÄRVI Raija (ed.) – 1987, "Hydrologinen vuosikirja 1981-1983, Hydrological yearbook 1981-1983", *Publications of the water research institute*, 66, 238 p.

_____ – 1990, *Hydrologinen vuosikirja 1984-1986*, Helsinki, National Board of Waters and the Environment, 235 p.

_____ – 1991, *Hydrologinen vuosikirja 1987-1988*, Helsinki, National Board of Waters and the Environment, 207 p.

_____ – 1992, *Hydrologinen vuosikirja 1989*, Helsinki, National Board of Waters and the Environment, 174 p.

_____ – 1993, *Hydrologinen vuosikirja 1990*, Helsinki, National Board of Waters and the Environment, 197 p.

_____ – 1994, *Hydrologinen vuosikirja 1991*, Helsinki, National Board of Waters and the Environment, 169 p.

HYVÄRINEN Veli (ed.) – 1996, "Hydrologinen vuosikirja 1993, Hydrological yearbook 1993", *Suomen Ympäristö*, 69, 166 p.

KORHONEN Johanna – 2007, "Hydrologinen vuosikirja 2001-2005; Hydrological Yearbook 2001-2005", *Suomen Ympäristö*, 44, 216 p.

LES SITES INTERNET

Baltic Environmental Atlas	http://maps.grida.no/baltic/
Baltic Ice-breaking Management	http://www.baltice.org
Central Statistical Bureau of Latvia	http://www.csb.lv
Commission Européenne	http://ec.europa.eu
Environnement Canada	http://www.ec.gc.ca
Food and Agriculture Organization	http://www.fao.org
Finnish Environment Institute (SYKE)	http://www.environment.fi
Finnish Institute of Marine Research	http://www.fimr.fi
Finnish Maritime Administration	http://www.fma.fi
Finnish Meteorological Institute	http://www.fmi.fi
Finnish Port Association	http://www.finnports.com
Freeport of Riga	http://www.freeportofriga.lv
Helsinki Commission (HelCom)	http://www.helcom.fi
Latvian Environment, Geology, and Meteorology Agency	http://www.meteo.lv
Latvian Fisheries Marketing and Information Centre	http://www.zic.lv
Organisation Météorologique Mondiale	http://www.wmo.int
Port of Oulu	http://www.ouluport.com
Marine Administration of Latvia	http://www.jurasadministracija.lv
Statistics Finland	http://www.stat.fi
Swedish Maritime Administration	http://www.sjofartsverket.se
Swedish Meteorological and Hydrological Institute	http://www.sjofartsverket.se

Glossaire

D'après la nomenclature des glaces de mer de l'Organisation météorologique mondiale

Banquette côtière (*ice foot*) – Étroite band de glace attachée à la côte, qui ne bouge pas avec la marée et qui retse en place quand la banquise côtière est partie en dérive.

Banquise consolidée (*consolidated pack ice*) – Banquise dont la concentration est de 10/10 (ou 8/8) et où les floes ont été soudés par le gel.

Banquise côtière (*fast ice*) – Glace de mer qui se forme et reste fixe le long de la côte, où elle est attachée soit au rivage, soit à un mur de glace [...]. La banquise côtière peut être formée sur place à partir de l'eau de mer ou d'une banquise de n'importe quel âge retenue au rivage par le gel ; elle peut s'étendre à plusieurs mètres comme à plusieurs centaines de kilomètres de la côte.

Banquise lâche (*open pack ice*) – Banquise dont la concentration est de 4/10 à 6/10 (3/8 à moins de 6/8) avec de nombreux chenaux et polynies ; les floes ne sont généralement pas en contact les uns avec les autres.

Banquise serrée (*close pack ice*) – Banquise dont la concentration est de 7/10 à 8/10 (6/8 à moins de 7/8) et qui est composée de floes dont la plupart sont en contact.

Banquise très lâche (*very open pack ice*) – Banquise dont la concentration est de 1/10 à 3/10 (1/8 à moins de 3/8) et où il y a plus d'eau que de glace.

Banquise très serrée (*very close pack ice*) – Banquise dont la concentration est de 9/10 à moins de 10/10 (7/8 à moins de 8/8).

Chenal (*lead*) – Toute fracture ou passage à travers la glace de mer accessible à un navire de surface.

Crête (*ridge*) – Ligne ou mur de glace brisée qui est soulevée par la pression. Peut être récente ou érodée. Le volume correspondant de glace brisée poussée vers le bas par la pression au-dessous d'une crête est appelé quille de glace.

Crête consolidée (*consolidated ridge*) – Crête dont la base est soudée par le gel.

Eau libre (*open water*) – Grande étendue d'eau librement navigable dans laquelle la glace de mer est présentée à des concentrations inférieures à 1/10 (1/8). Il peut y avoir de la glace d'origine terrestre, mais la concentration totale de toute la glace présente ne doit pas excéder 1/10 (1/8).

Floe (*floe*) – Tout fragment de glace de mer relativement plat ayant 20 m ou plus d'extension horizontale.

Gadoue (*slush*) – Neige saturée et mélangée d'eau reposant sur la terre ou sur la glace, ou masse visqueuse flottant sur l'eau après une forte chute de neige.

Glace en crêpes (*pancake ice*) – Morceaux de glace de forme circulaire, ayant de 30 cm à 3 m de diamètre et jusqu'à 10 cm d'épaisseur, avec des bords relevés du fait du frottement des morceaux les uns contre les autres[...]. La glace en crêpes se forme aussi parfois en profondeur, à l'interface entre deux masses d'eau ayant des caractéristiques physiques différentes, d'où elle remonte en surface. Elle peut rapidement couvrir de grandes étendues d'eau.

Glace entassée ou empilée (*rafted ice*) – Type de déformation de la glace dans laquelle les plaques de glace se chevauchent les unes les autres.

Glace « hummockée » (*hummocked ice*) – Glace de mer empilée au hasard, un fragment sur un autre, et formant une surface irrégulière. Quand elle est érodée, cette glace semble faite de monticules arrondis.

Glace plane (*level ice*) – Glace de mer qui n'a subi aucune déformation.

Hummock (*hummock*) – Monticule de glace brisée qui a été soulevée par la pression. Peut être récent ou érodé.

Libre de glace (*ice-free*) – Aucune glace n'est présente.

Mare (*puddle*) – Accumulation sur la glace d'eau de fonte provenant principalement de la fonte de la neige mais, aux stades les plus avancés, aussi de la fonte de la glace. Au début, ces mares sont de simples flaques de neige fondue.

Nilas (*nilas*) – Couche de glace mince et élastique, ondulant facilement sous les vagues et la houle ou sous la pression, et formant sous la pression des avancées en forme de « doigts » entrecroisés. Cette couche peut atteindre 10 cm d'épaisseur.

Polynie (*polynia*) – Toute ouverture de forme non linéaire enclose dans la glace. Le polynies peuvent contenir du « brash » (sarrasins) et/ou être couvertes de nouvelle glace, de nilas ou de jeune glace [...].

Sarrasins (*brash ice*) – Accumulation de glaces flottantes composées de fragments qui n'ont pas plus de 2 m d'extension et qui proviennent de la destruction d'autres formes de glace.

Trous de fonte (*thaw holes*) – Trous verticaux dans la glace de mer qui se forment quand, du fait de la fusion, les mares de surface rejoignent l'eau de mer sous-jacente.

- Annexe 1** – La Hanse aux XIV^{ème} et XV^{ème} siècles
- Annexe 2** – Exemple de rapport sur les conditions de glace et de navigation
- Annexe 3** – Le Code des glaces de mer de la Mer Baltique
- Annexe 4** – Personnalités rencontrées qui ont contribué à la quête d'information
- Annexe 5** – Indications sur les données météorologiques des stations d'Oulu et de Riga
- Annexe 6** – Le satellite Envisat
- Annexe 7** – Les principaux cours d'eau du bassin-versant de la Baie de Botnie
- Annexe 8** – Description de certaines centrales hydro-électriques finlandaises
- Annexe 9** – Étendue de l'extension maximale du couvert de glace en Mer Baltique par hiver de 1720 à 2005
- Annexe 10** – Enquête sur la fréquentation de la banquise
- Annexe 11** – Le pouvoir de refroidissement du vent
- Annexe 12** – Capacité de la glace en fonction de son épaisseur
- Annexe 13** – Correspondance des classes de navires (« ice class »)
- Annexe 14** – Les brise-glaces *Tuura*, *Sisu* et *Varma*
- Annexe 15** – Les flottes de déglacage finlandaise et suédoise
- Annexe 16** – IBPlott – Situation en Baie de Botnie
- Annexe 17** – Article de journal : « Campement sur la glace sous -22°C »
- Annexe 18** – Articles de journaux sur des accidents et incidents survenus sur la banquise en Baie de Botnie
- Annexe 19** – Illustrations de la vie sur la banquise au XVIII^{ème} siècle par E. Clarke
- Annexe 20** – Estimations des modèles couplés océan – glaces de mer sur les conditions glacielles futures de la Baltique en 2100
- Annexe 21** – Durées de fonctionnement des brise-glaces dans les eaux finlandaises pour les hivers 2000/01 à 2008/09
- Annexe 22** – Cartes des ports d'Oulu et de Riga

Annexe 1

La Hanse aux XIV^{ème} et XV^{ème} siècles



Source : Dollinger, 1988

Exemple de rapport sur les conditions de glace et de navigation

**FINNISH INSTITUTE
OF MARINE RESEARCH
ICE SERVICE**

P.O. Box 304
FI-00181 Helsinki

FINNISH ICEREPORT

Nr 43
01.03.2006

ICEBREAKING SERVICE

Traffic 0204 48 4216
Ice situation 09-685 7659
Fax 09-685 7638

STFI42 EFKL 010920

FINNISH ICE REPORTS 01.03.2006

New ice formation continues.

In the northern part of the Bay of Bothnia there is 30-65 cm thick fast ice in the archipelago. Off the fast ice edge there is 20-40 cm thick ridged and rafted very close drift ice approximately to the line Bjuröklubb – Nahkiainen. In the ice field there are large areas of 25-40 cm thick ridged ice in places. Farther south 10-25 cm thick level ice. Off the Swedish coast a 10-20 nautical miles wide lead covered with thin ice from Rödkallen to the Quark.

In the southern part of the Bay of Bothnia 30-45 cm thick fast ice in the archipelago. Farther out 10-25 cm thick level ice.

In the Quark 30-50 cm thick fast ice in the archipelago. Farther out 5-20 cm thick close or very close drift ice and thicker floes in places. The ice edge runs approximately at the latitude of Strömmingsbådan.

In the Sea of Bothnia 25-50 cm thick fast ice in the archipelago. Off the fast-ice edge there is 15-20 nautical miles wide belt of thin ice or new ice. Off the Swedish coast new ice and ice formation.

In the Archipelago Sea there is 10-35 cm thick fast ice and level ice in the archipelago reaching Isokari and Utö.

In the Gulf of Finland 20-40 cm thick fast ice in the archipelago. Off the archipelago first approximately 5 nautical miles of 20-30 cm thick partly ridged, very close drift ice, and then a 5-10 nautical miles wide lead, covered with thin ice. Farther out 5-20 cm thick, partly ridged, very close drift ice to the latitude of Hanko. Farther west 5-10 cm thick close drift ice and level ice to the ice edge which is approximately along the line Utö – Glotovi. In the Bay of Vyborg and the Bay of St. Petersburg 40-60 cm thick fast ice. Farther out 30-45 cm thick, partly ridged, very close drift ice to Gogland.

Restrictions to navigation: To Tornio, Kemi, Oulu and Raahel only vessels of ice class IA and of more than 3000 tons in deadweight will be assisted. To Kokkola, Pietarsaari, Vaasa and Kaskinen only vessels of ice class IA of more than 2000 tons in deadweight will be assisted. To Pori, Rauma and Uusikaupunki only vessels of ice classes IA and IB of more than 2000 tons in deadweight and vessels of ice classes IC and II of more than 3000 tons will be assisted. To Naantali, Turku, Hanko and Koverhar only vessels of ice classes IA and IB of more than 1300 tons in deadweight and IC and II of more than 2000 tons will be assisted. To Inkoo, Kantvik and Helsinki only vessels of ice classes IA and IB of more than 2000 tons in deadweight and IC of more than 3000 tons will be assisted. To Porvoo only vessels of ice classes IA and IB of more than 2000 tons in deadweight will be assisted. To Loviisa, Kotka and Hamina only vessels of ice class IA of more than 2000 tons in deadweight will be assisted.

Icebreakers: Otso, Urho, Kontio and Frej assist in the Bay of Bothnia. Apu assists in the Sea of Bothnia. Voima, Sisu and Fennica assist in the Gulf of Finland.

The traffic separation schemes in the Gulf of Finland between Porkkalanniemi Peninsula and Kalbådagrund are temporarily out of use due to ice conditions.

Vessels bound for ports with traffic restrictions in the Gulf of Bothnia shall report to VTS Stockholm when passing the Svenska Björn lighthouse.

Annexe 3

Le Code des glaces de mer de la Mer Baltique

D'après SMHI, 1981, The Baltic Sea ice code

AB – Amount and arrangement of sea ice

- 0 Ice free
- 1 Open water – concentration less than 1/10
- 2 Very open pack ice – concentration 1/10 to less than 4/10
- 3 Open pack ice – concentration 4/10 to 6/10
- 4 Close pack ice – concentration 7/10 to 8/10
- 5 Very close pack ice – concentration 9/10 to 9+/10 *)
- 6 Compact pack ice, including consolidated pack ice – concentration 10/10
- 7 Fast ice with pack ice outside
- 8 Fast ice
- 9 Lead in very close or compact pack ice or along the fast ice edge
- / Unable to report
- *) 9+/10 means ice concentration 10/10 with minor leads

SB – Stage of development

- 0 New ice or dark nilas (less than 5 cm thick)
- 1 Light nilas (5-10 cm thick)
- 2 Grey ice (10-15 cm thick)
- 3 Grey-white ice (15-30 cm thick)
- 4 White ice, first stage (30-50 cm thick)
- 5 White ice, second stage (50-70 cm thick)
- 6 Medium first year ice (70-120 cm thick)
- 7 Ice predominately thinner than 15 cm with some thicker ice
- 8 Ice predominately grey-white (15-30 cm) with some ice thicker than 30 cm
- 9 Ice predominately thicker than 30 cm with some thinner ice
- / No information or unable to report

TB – Topography or form of ice

- 0 Pancake ice, ice cakes, brash ice – less than 20 m across
- 1 Small ice floes – 20-100 m across
- 2 Medium ice floes – 100-500 m across
- 3 Big ice floes – 500-2000 m across
- 4 Vast or giant ice floes – more than 2000 m across – or level ice
- 5 Rafted ice
- 6 Compacted slush or shuga, or compacted brash ice
- 7 Hummocked or ridged ice
- 8 Thaw holes or many puddles on ice
- 9 Rotten ice
- / No information or unable to report

KB – Navigation conditions in ice

- 0 Navigation unobstructed.
- 1 Navigation difficult or dangerous for wooden vessels without ice sheathing.
- 2 Navigation difficult for unstrengthened or low-powered vessels built of iron or steel. Navigation for wooden vessels even with ice sheathing not advisable.
- 3 Navigation without icebreaker assistance possible only for high-powered vessels of strong construction and suitable for navigation in ice.
- 4 Navigation proceeds in lead or broken ice-channel without assistance of an icebreaker
- 5 Icebreaker assistance can only be given to vessels suitable for navigation in ice and of special size
- 6 Icebreaker assistance can only be given to vessels of special ice class and of special size
- 7 Icebreaker assistance can only be given to vessels after special permission
- 8 Navigation temporarily closed
- 9 Navigation has ceased
- / Unknown

Annexe 4

Personnalités rencontrées qui ont contribué à la quête d'information

	Personnes	Fonctions	Date	Lieu	Données collectées
1	5 Avril – 1^{er} Mai 2004, Oulu, Finlande <i>Établissement d'accueil principal : Département de Géographie de l'Université d'Oulu</i>				
	Jarmo RUSANEN	Directeur du Département de Géographie de l'Université d'Oulu et Professeur en Géoinformatique	Avril 2004	Université d'Oulu	<ul style="list-style-type: none"> • Premiers contacts
2	31 Août 2004 – 15 Juin 2005, Oulu, Finlande <i>Établissement d'accueil principal : Département de Géographie de l'Université d'Oulu</i>				
	Matti LEPPÄRANTA	Professeur de Géophysique à l'Université d'Helsinki	5 Novembre 2004	Université d'Helsinki	<ul style="list-style-type: none"> • Information sur la géophysique des glaces, l'histoire du FIMR • Articles • Images satellitaires ENVISAT • Contacts
	Ari SEINÄ	Directeur du Service des glaces du FIMR	5 Novembre 2004	Service des glaces, FIMR, Helsinki	<ul style="list-style-type: none"> • Articles • Atlas climatologiques
	Kirsi ESKOLA	Employée à l'office du tourisme d'Oulu	12 Janvier 2005	Office de tourisme d'Oulu	<ul style="list-style-type: none"> • Statistiques sur le tourisme à Oulu • Informations diverses
	Matti RAATIKAINEN	Capitaine du brise-glace Tuura	11 Février 2005	À bord du brise-glace, Port d'Oulu	<ul style="list-style-type: none"> • Cartes bathymétriques • Informations sur le port d'Oulu et le brise-glace • Rendez-vous pour une mission d'assistance à un navire
	Kyösti MARJONIEMI	Chercheur au département de Biologie, Université d'Oulu	4 Avril 2005	Station de recherche à Marjaniemi, Hailuoto	<ul style="list-style-type: none"> • Cartes sur les conditions de glaces du FIMR • Mesures du gel dans le sol à Marjaniemi, Hailuoto

	Inese MIKELSONE	Conseillère à la direction du développement, LEGMA	7 Avril 2005	LEGMA, Riga, Lettonie	<ul style="list-style-type: none"> • Prise de contact pour la prochaine mission à Riga • Documentation bibliographique
	Yuriy SHISKIN	Spécialiste au département et d'information, LEGMA Responsable du service maritime	7 Avril 2005	LEGMA, Riga, Lettonie	<ul style="list-style-type: none"> • Prise de contact por la prochaine mission à Riga
Février - 11 Avril 2006 , Riga, Lettonie					
3 11 - 12 Avril 2006, Helsinki, Finlande					
12 - 23 Avril, Oulu, Finlande					
			<i>Établissement d'accueil principal : LEGMA, Riga</i>		
			<i>Département de Géographie de l'Université d'Oulu</i>		
	Guntis EBERHARDS	Professeur émérite, Faculté de Géographie et des Sciences de la Terre, Université de Riga	20 Février 2006	Université de Riga	<ul style="list-style-type: none"> • Informations sur l'érosion des côtes du Golfe de riga • Documentation bibliographique
	Capitaine Hermanis CERNOVS	Capitaine et Chef de Service des Garde-côtes (Latvian Naval Forces)	23 Mars 2006	Service des Garde-côtes, Riga	<ul style="list-style-type: none"> • Informations sur le service des garde-côtes de Riga et sur la navigation hivernale • Rendez-vous pour un survol en hélicoptère du Golfe de Riga
	Ansis ZELTIŅŠ	Directeur de l'Administration Maritime de Lettonie	28 Mars 2006	Administration Maritime de Lettonie, Riga	<ul style="list-style-type: none"> • Personnes à contacter • Statistiques sur le port de Riga
	Capitaine Valdis DREIMANIS	Inspecteur chef de la navigation et des ports, Département de la sécurité maritime, Administartion Maritime de Lettonie	30 Mars 2006	Administration Maritime de Lettonie, Riga	<ul style="list-style-type: none"> • Informations sur le brise-glace Varma et sur la régulation maritime
	Juha LAATUNEN	Archiviste, Institut finlandais de Météorologie (FMI)	11 Avril 2006	FMI, Helsinki	<ul style="list-style-type: none"> • Archives de données climatiques
	Jari HAAPALA	Chercheur, Département de Physique, FIMR	12 Avril 2006	FIMR, Helsinki	<ul style="list-style-type: none"> • Informations sur les conditions de glace • Documentation bibliographique
	Markku KOHONEN	Lieutenant de vaisseau, Garde-côte d'Oulu	18 Avril 2006	Station des garde-côtes de Virpiniemi	<ul style="list-style-type: none"> • Informations sur les conditions de glace en Baie de Botnie et sur les garde-côtes de Finlande • Visite de la station
	Päivi VÄHÄNIKKILÄ-KURONEN	Directrice administrative, Port d'Oulu	19 Avril 2006	Port d'Oulu	<ul style="list-style-type: none"> • Statistiques et documentation sur le port d'Oulu

	Kaarlo HEIKKINEN	Responsable du trafic maritime, Port d'Oulu	19 Avril 2006	Port d'Oulu	• Visite du Port d'Oulu
4	6 – 20 Mars 2007, Oulu, Finlande		<i>Établissement d'accueil principal : Département de Géographie de l'Université d'Oulu</i>		
	Markku KOHONEN	Lieutenant de vaisseau, Garde-côte d'Oulu	8 Mars 2007	Hôtel de Police, Oulu	• Personnes à contacter
			19 Mars 2007	Station des garde-côtes de Virpiniemi	<ul style="list-style-type: none"> • Statistiques sur les accidents en mer • Informations sur les technologies employées
	Capitaine du brise-glace SISU		8 Mars 2007	À bord du brise-glace SISU accosté au port d'Oulu	• Informations sur l'activité du brise-glace SISU
	Kari & al.	Pêcheurs semi-professionnels	10 Mars 2007	Haukipudas	• Excursion : pêche blanche (observation)
	Jouni HEINIKOSKI	Chasseur de phoques	14 Mars 2007	Université d'Oulu	• Informations sur la chasse aux phoques en Mer Baltique
	Jarkko SEPPÄ	Kyte surfer	17 Mars 2007	Nallikari, Oulu	<ul style="list-style-type: none"> • Informations sur le snow kyte • Observation
	Lasse REKILÄ	Pêcheur professionnel	19 Mars 2007	Haukipudas	<ul style="list-style-type: none"> • Informations sur la pêche professionnelle • Visite de son chantier et marina : construction d'aéroglysieur
5	24 Octobre – 3 Novembre 2007, Oulu, Finlande		<i>Établissement d'accueil principal : Département de Géographie de l'Université d'Oulu</i>		
	Markku KOHONEN	Lieutenant de vaisseau, Garde-côte d'Oulu	29 Octobre 2007	Station des garde-côtes de Virpiniemi	<ul style="list-style-type: none"> • Statistiques sur les accidents en mer • Articles de journaux
6	11 Février – 11 Juin 2008, Oulu, Finlande		<i>Établissement d'accueil principal : Département de Géographie de l'Université d'Oulu</i>		
	Markku KOHONEN	Lieutenant de vaisseau, Garde-côte d'Oulu	11 Mars 2008	Station des garde-côtes de Virpiniemi	• Articles de journaux

Annexe 5

Indications sur les données météorologiques des stations d'Oulu et de Riga

Annexe 5a – La station météorologique d'Oulu

OULU		Coordonnées géographiques	Sources bibliographiques	Paramètres mesurés
1873 – 1880		65° 01' N ; 43° 08' E de Ferro	Françaises	- Températures en degrés Celsius
1881 - 1890	1881 - 1882	65° 01' N ; 25° 27' E de Greenwich Altitude : 10,4 mètres au-dessus du niveau de la mer		- Températures en degrés Celsius - Force du vent
	1883 - 1890			<i>Idem</i> - Précipitations totales (mm) - Humidité
1891 - 1900				- Température moyenne (°C) - Précipitations totales (mm) et en nombre de jours - Force du vent et sa fréquence relative en fonction des directions
1901 - 1910	1901 - 1902		Allemandes	- Températures moyenne, minimale et maximale absolues - Précipitations totales (mm), en nombre de jours et neigeuses (jours) - Vent (m/s) et direction
	1903 - 1910			
1911 – 1920	1911-1915			<i>Idem</i> - Humidité moyenne
	1916-1920			
1921 – 1930			?	
1931 – 1940	1931 - 1936			
	1937 - 1940			
1941 – 1950				<i>Idem</i> - Gel (jours) - Précipitations pluvieuses (jours)
1951 - 1960	1951 - 1953	Aéroport	Finlandaises	- Température moyenne, minimale et maximale - Précipitations totales (mm), majorité dans une journée - Épaisseur de neige au 15 du mois (cm) - Gel (jours) - Direction et vitesse du vent en noeud
	1954 - 1956			
	1957 - 1960			
1961 – 1970				<i>Idem</i> - Direction et vitesse du vent en m/s (pas de mesure pour 1966 – 1970)
1971 – 1980				
1981 – 1990				
1991 – 2000				
2001 - 2007				

Annexe 5b – La station météorologique de Riga

RIGA	Coordonnées géographiques	Sources bibliographiques	Paramètres mesurés
1795 - 1814	Riga	Allemandes	- Température moyenne en degrés Réaumur ¹ puis Celsius
1814 - 1824	Université de Riga	Lettones	
1824 - 1831	Riga	Allemandes	
1850 - 1868	Riga - 56° 57'		- Température moyenne (°C) - Humidité - 1865 - nombre de vents
1870	Riga - 56° 59' N ; 41° 46' du méridien de Ferro ²	Allemandes sur imprimés russes	- Température moyenne (°C) - Humidité - Précipitations pluvieuses et neigeuses (nombre de jours) - Vents (fréquence)
1875 - 1879	56° 51' 10'' N ; 1h 36m 24s de Greenwich (24° 6' de Greenwich à partir de 1877)		- Températures moyenne, minimale et maximale absolues (°C) - Gel (nombre de jours) - Humidité - Précipitations totales (mm) - Vents (m/s)
1921 - 1922	Riga	Lettones et russes	- Températures moyenne, minimale et maximale absolues (°C) - Gel (nombre de jours) - Humidité - Précipitations totales (mm), pluvieuses et neigeuses (nombre de jours) jusqu'en 1965 - Vents (m/s)
1926 - 1940	Riga Augstskola ³	Lettones	
1941 - 1943	56° 58' N ; 24° 02' E		
1943 - 1973		Russes	
1973 - 1992	Inconnues	Lettones	- Températures moyenne, minimale et maximale absolues (°C) - Gel (nombre de jours) - Humidité - Précipitations totales (mm) - Vents (m/s)
1992 - 2005			

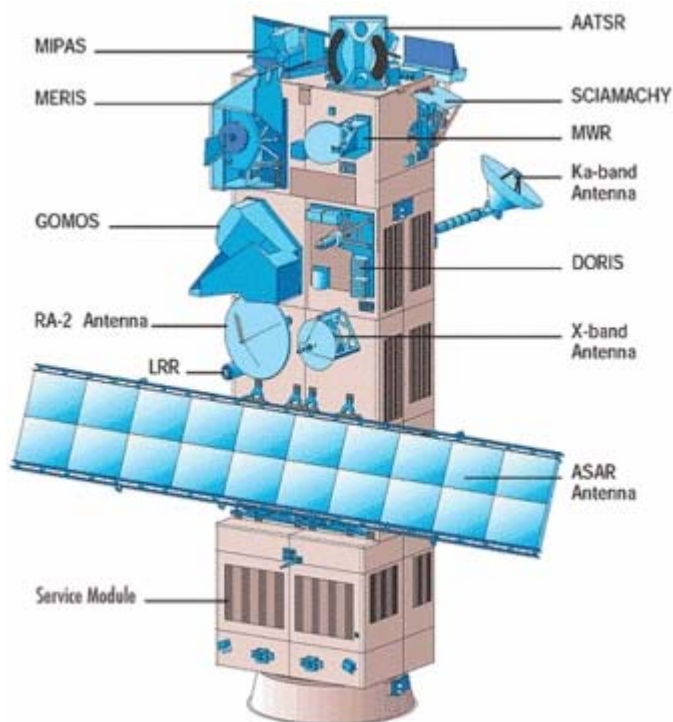
¹ Un degré Réaumur vaut 4/5 d'un degré Celsius

² Longitude de Ferro (Iles Canaries) = Longitude de Greenwich + 17° 40'

³ Université

Le satellite Envisat

D'après SEOS (www.seos-project.eu)



MIPAS (Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding) : ce spectromètre infrarouge a été conçu pour fournir des profils de pression atmosphérique, de température et de gaz à l'état de traces. MIPAS fonctionne avec une résolution spectrale élevée et dans une bande spectrale étendue.

MERIS (*Medium-Spectral Resolution Imaging Spectrometer*) : cet instrument mesure le rayonnement solaire réfléchi par la surface de la Terre et par les nuages. Il peut enregistrer des informations dans 15 bandes spectrales différentes entièrement programmables dans le visible et dans le proche infrarouge.

GOMOS (Instrument de surveillance de l'ozone à l'échelle du globe par occultation d'étoiles) : il mesure les constituants atmosphériques par analyse spectrale des bandes spectrales dont la longueur d'onde est comprise entre 250-675 nm, 756-773 nm et 926-952 nm. Il possède en plus deux photomètres qui opèrent respectivement dans les bandes 470-520 nm et 650-700 nm.

RA-2 (*Radar Altimeter 2*) : RA-2 est un instrument servant à mesurer le temps de retour des échos de fréquences radar depuis la surface de la Terre avec une précision de moins d'une nanoseconde. Il mesure aussi le niveau de puissance et la forme des ondes radar réfléchies.

AATSR (*Advanced Along Track Scanning Radiometer*) : cet instrument a pour but d'assurer la continuité des instruments ATSR-1/2 embarqués sur ERS-1/2. Les scientifiques pourront ainsi disposer, sur une durée quasi continue de dix années, d'un jeu de données de températures de la surface de la mer ayant une précision de l'ordre de 0,3 K, voire d'avantage.

SCIAMACHY (SCanning Imaging Absorption SpectroMeter for Atmospheric ChartographY) : cet instrument mesure à l'échelle globale les gaz à l'état de traces présents dans la troposphère et dans la stratosphère.

MWR (*MicroWave Radiometer*) : ce radiomètre passif mesure la vapeur d'eau atmosphérique et la teneur en eau liquide des nuages à l'intérieur d'une empreinte conique de 20 km de diamètre. Il fournit une correction atmosphérique en temps réel des mesures de temps fournies par le RA-2. Il peut aussi être utilisé pour des mesures à faible résolution de l'émissivité de surface et de l'humidité des sols.

DORIS (*Doppler Orbitography and Radio-positioning Integrated by Satellite*) : grâce à ce système de poursuite hyperfréquences, on peut connaître la position exacte d'un satellite dans l'espace et déterminer celle d'Envisat à quelques centimètres près.

ASAR (*Advanced Synthetic Aperture Radar*) : ce radar opère dans la bande-C et il assure la continuité des instruments SAR et AMI embarqués à bord des satellites ERS-1/2.

Les principaux cours d'eau du bassin-versant de la Baie de Botnie

Source : Johansson, 2005

Oulujoki

La rivière Oulujoki est dotée d'une série de lacs dont le plus grand est Oulujärvi, situé à 122 mètres d'altitude, de 900 km², de profondeur maximale de 36 mètres et de profondeur moyenne équivalente à 7,6 mètres. Le cours d'eau préglaciaire Oulujoki se déverse dans la Baie de Botnie et est connecté à la rivière Luleälven du côté suédois.

La partie supérieure du bassin-versant est caractérisée par une surface d'érosion disséquée par les glaciers et présente des modelés accidentés, en partie des drumlins, des moraines « bosselées » et quelques eskers.

Le cours pré-quaternaire d'Oulujoki en aval du lac Oulujärvi a été obstrué par d'importants dépôts fluvioglaciaires, ainsi un nouveau cours s'est formé par érosion vers le Nord. L'actuel cours d'Oulujoki s'est formé une centaine d'années BC. Sur les plaines côtières, la rivière est incisée dans plusieurs dizaines de mètres de terrains quaternaires, principalement des dépôts fluvioglaciaires. Le cours en amont de chaque barrage hydroélectrique est constitué de longs rapides. La rivière Oulujoki est presque exploitée dans sa totalité par des centrales à production d'énergie hydroélectrique. Le plus important barrage est celui de Pyhäkoski (31 m).

Kemijoki

La rivière Kemijoki est le plus important cours d'eau du bassin hydrographique du Golfe de Botnie. La partie supérieure de son bassin-versant est caractérisé par un relief de petites montagnes où prédominent les granulites de Laponie. La Kemijoki et ses affluents drainent en aval de larges plaines accidentées.

Le Nord du bassin-versant est dominé par des tourbières à palsa puis plus en aval par des drumlins et des terrains morainiques.

Le plus long affluent, la rivière Kitinen, s'écoule à travers la ceinture de granulites de Laponie dans une large plaine parsemée de tourbières jusqu'au lac artificiel, le réservoir Porttipahta. Le barrage de ce lac est haut de 30 mètres. Le lac est connecté à un autre lac artificiel, le Lokka. Ces deux plus grands réservoirs de Finlande sont connectés pour le contrôle des débits.

En aval de la confluence avec le cours d'eau Korojoki, la Kemijoki poursuit son cours dans une vallée de plaine inondable jusqu'à l'encontre de la vallée de la rivière Ounasjoki. Les vallées de ces cours d'eau sont décrites comme d'importantes formes fluviales.

La rivière Ounasjoki n'est pas exploitée. Elle est protégée par une loi spéciale et est considérée comme étant une rivière Natura 2000. Ses principales sources viennent du Nord près de la frontière finno-norvégienne. Son bassin-versant a un faible pourcentage de lacs. Les plus larges sont Pöyrisjärvi, à 418 mètres d'altitude près de la Norvège, et Pallasjärvi (267 mètres d'altitude) dans les montagnes de Pallastunturi. Dans sa partie amont, il existe de nombreux drumlins parallèles à la vallée, et également de nombreux dépôts fluvioglaciaires tels des eskers. Le plus long esker traverse Kittilä – Kemijärvi – Oulanka.

À l'embouchure de la Kemijoki, le delta est affecté par la station hydroélectrique à Isohaara.

Tornionjoki / Torneälven

Le bassin-versant de la Tornionjoki est protégé de toute construction d'ouvrages hydroélectriques par le Code Environnemental. La frontière finno-suédoise suit le talweg de la rivière Könkämäeno (qui prend sa source dans le lac Kilpisjärvi), de la Muonionjoki et du fleuve Tornionjoki jusqu'à l'embouchure entre Tornio (Finlande) et Haparanda (Suède).

Le Könkämäeno a un cours sinueux avec quelques rapides et lacs. Son environnement est riche en tourbières à palsa. La Muonionjoki poursuit le cours dans une vallée de relief de basses montagnes. Entre Yli-Muonio et Muonio il existe un delta avec de nombreuses ramifications. À

Kolari la rivière se sépare en deux. Les collines résiduelles qui l'entourent sont parsemées de tourbières. En aval, la rivière et sa série de rapides parcourent des plaines inondables.

Le bassin-versant du fleuve Tornionjoki a de larges et peu profondes vallées. De grandes surfaces de tourbières dominent notamment les paises dans le Nord. Torneträsk, à 360 mètres d'altitude, est un des lacs les plus profonds (160 m) des Alpes scandinaves. Le domaine calcaire auquel il appartient est riche en phénomènes karstiques tels que les dolines, les cours d'eau souterrains. En aval du lac Torneträsk, le fleuve Tornionjoki traverse une série de rapides et de lacs.

Il existe de nombreuses vallées fluvioglaciaires, des canaux d'eau de fonte et des dépôts glaciaires en amont de la confluence de la Tornionjoki et de la Muonionjoki.

L'actuelle embouchure de la Tornionjoki entre Tornio et Haparanda se déverse dans un delta formé par un grand archipel. Le chenal Sud-Est du côté de Tornio est plus étroit.

Luleälven

La Luleälven est une rivière de montagne dont la puissance est principalement développée par la production d'énergie hydroélectrique. Ses sources proviennent de lacs de hautes montagnes qui se déversent dans des vallées profondes dotées de séries de lacs. En amont de ces montagnes et de ces lacs, la rivière s'écoule dans une vallée incisant des plaines accidentées.

La puissance hydraulique de la rivière Luleälven est quasiment basée sur les centrales électriques qui produisent la plupart de l'électricité en Suède.

La rivière Luleälven est ensuite profondément incisée dans des dépôts sédimentaires d'une large vallée aux hauts escarpements. Le cours préglaciaire se poursuit dans un profond chenal dans le fond de la Baie de Botnie. Le chenal glaciofluvial était probablement connecté à un important esker le long de la vallée de la rivière Oulujoki en Finlande.

Annexe 8

Description de certaines centrales hydro-électriques finlandaises

Source :Korhonen, 2007

Stations	Cours d'eau	Coordonnées	Propriétaire de la centrale
Kemijoki			
Porttipahta	Lac artificiel de Porttipahta	67°57'N ; 26°44'E	Kemijoki Oy
Jumisko	Iso-Askan	66°30'N ; 27°47'E	PVO-Pool Oy
Seitakorva	Lac Kemijärvi	66°28'N ; 27°21'E	Kemijoki Oy
Vanttauskoski	Kemijoki	66°22'N ; 26°41'E	Kemijoki Oy
Valajaskoski	Kemijoki	66°25'N ; 25°32'E	Kemijoki Oy
Isohaara	Kemijoki	65°47'N ; 24°32'E	PVO-Pool Oy
Iijoki			
Haapakoski	Iijoki	65°19'N ; 26°12'E	PVO-Pool Oy
Raasakka	Iijoki	65°20'N ; 25°24'E	PVO-Pool Oy
Oulujoki			
Katerma	Lac Ontojärvi	64°05'N ; 28°58'E	Fortum Power and Heat Oy
Ämmäkoski	Lac Kiantajärvi	64°52'N ; 28°55'E	Fortum Power and Heat Oy
Aittokoski		64°50'N ; 28°51'E	Fortum Power and Heat Oy
Seitenoikea	Emäjoki	64°35'N ; 28°25'E	Fortum Power and Heat Oy
Pyhäntä	Iso-Pyhän	64°29'N ; 28°22'E	Kainuun Sähkö Oy
Koivukoski	Nuasjärvi	64°13'N ; 27°44'E	Fortum Power and Heat Oy
Jylhäma	Oulujärvi	64°34'N ; 26°47'E	Fortum Power and Heat Oy
Merikoski	Oulujoki	65°01'N ; 25°28'E	Ville d'Oulu
Siikajoki			
Uljua	Siikajoki	64°20'N ; 25°52'E	Vattenfall Sähköntuotanto Oy
Kalajoki			
Padinki	Kalajoki	64°00'N ; 24°46'E	Oy Herrfors Ab
Ähtävänjoki			
Hanhikoski	Ähtävänjoki	63°19'N ; 23°34'E	Vattenfall Sähköntuotanto Oy
Kattilakoski	Ähtävänjoki	63°26'N ; 23°22'E	Oy Herrfors Ab
Herrfors	Ähtävänjoki	63°37'N ; 22°53'E	Oy Herrfors Ab
Lapuanjoki			
Hirvikoski	Nurmonjoki	62°48'N ; 23°02'E	Vattenfall Sähköntuotanto Oy

Annexe 9

Classification de l'étendue maximale du couvert de glace en Mer Baltique par hiver de 1720 à 2005 (x 1000 km²)

Précision : l'hiver 1720 signifie l'hiver 1719-1720

N°	Hiver	Type	Surface	N°	Hiver	Type	Surface
1	2008	Extrêmement modéré	49	51	1974	Modéré	94
2	1989	Extrêmement modéré	52	52	2000	Modéré	95
3	1961	Extrêmement modéré	53	53	1825	Modéré	96
4	1930	Extrêmement modéré	58	54	1973	Modéré	99
5	1939	Extrêmement modéré	61	55	1756	Modéré	100
6	1949	Extrêmement modéré	62	56	1759	Modéré	100
7	1944	Extrêmement modéré	64	57	1773	Modéré	100
8	1992	Extrêmement modéré	66	58	1793	Modéré	100
9	1990	Extrêmement modéré	67	59	1794	Modéré	100
10	1995	Extrêmement modéré	68	60	2002	Modéré	102
11	1790	Extrêmement modéré	70	61	1866	Modéré	104
12	1835	Extrêmement modéré	70	62	1742	Modéré	105
13	1938	Extrêmement modéré	70	63	1832	Modéré	105
14	1993	Extrêmement modéré	70	64	1744	Modéré	109
15	1878	Extrêmement modéré	72	65	1945	Modéré	109
16	1887	Extrêmement modéré	74	66	1753	Modéré	110
17	1975	Extrêmement modéré	74	67	1779	Modéré	110
18	1822	Extrêmement modéré	76	68	1911	Modéré	110
19	1722	Extrêmement modéré	78	69	1934	Modéré	110
20	1724	Extrêmement modéré	78	70	1950	Modéré	113
21	1725	Extrêmement modéré	79	71	1741	Modéré	115
22	1730	Extrêmement modéré	79	72	1872	Modéré	116
23	1735	Extrêmement modéré	80	73	1983	Modéré	117
24	1791	Extrêmement modéré	80	74	1913	Modéré	118
25	1819	Extrêmement modéré	80	75	1952	Modéré	120
26	1842	Extrêmement modéré	80	76	1991	Modéré	122
27	1859	Extrêmement modéré	80	77	1763	Modéré	124
28	1864	Extrêmement modéré	80	78	1880	Modéré	125
29	1882	Extrêmement modéré	81	79	1921	Modéré	125
30	1890	Extrêmement modéré	81	80	1891	Modéré	126
31	1894	Extrêmement modéré	81	81	1927	Modéré	126
32	1910	Extrêmement modéré	81	82	1854	Modéré	127
33	1750	Extrêmement modéré	84	83	1884	Modéré	127
34	1824	Extrêmement modéré	84	84	1914	Modéré	127
35	1943	Extrêmement modéré	84	85	1997	Modéré	128
36	1906	Extrêmement modéré	85	86	2001	Modéré	128
37	1874	Extrêmement modéré	88	87	1998	Modéré	129
38	1925	Extrêmement modéré	89	88	1720	Modéré	130
39	1743	Extrêmement modéré	90	89	1721	Modéré	130
40	1764	Extrêmement modéré	90	90	1848	Modéré	130
41	1769	Extrêmement modéré	90	91	1734	Modéré	131
42	1817	Extrêmement modéré	90	92	1737	Modéré	131
43	1833	Extrêmement modéré	90	93	1727	Modéré	132
44	1843	Extrêmement modéré	90	94	1869	Modéré	132
45	1858	Extrêmement modéré	90	95	1905	Modéré	134
46	1863	Extrêmement modéré	90	96	1801	Modéré	136
47	1873	Extrêmement modéré	90	97	1907	Modéré	139
48	1935	Extrêmement modéré	90	98	2007	Modéré	139
49	1959	Extrêmement modéré	90	99	1807	Modéré	140
50	1903	Extrêmement modéré	92	100	1879	Modéré	140

N°	Hiver	Type	Surface
101	1898	Modéré	140
102	1798	Modéré	142
103	1896	Modéré	143
104	1761	Modéré	146
105	1932	Modéré	148
106	1933	Modéré	148
107	1936	Modéré	148
108	1951	Modéré	149
109	1988	Modéré	149
110	1919	Modéré	150
111	1964	Modéré	150
112	1920	Modéré	151
113	1797	Modéré	152
114	1955	Modéré	152
115	2004	Modéré	152
116	1953	Modéré	153
117	1965	Modéré	153
118	1796	Modéré	156
119	1971	Modéré	157
120	1999	Modéré	157
121	1815	Modéré	160
122	1826	Modéré	160
123	1962	Modéré	160
124	1912	Modéré	161
125	1918	Modéré	161
126	1937	Modéré	161
127	1976	Modéré	164
128	1885	Modéré	167
129	1957	Modéré	169
130	1762	Modéré	170
131	1837	Modéré	172
132	1928	Modéré	172
133	1852	Modéré	173
134	1931	Moyen	175
135	1981	Moyen	175
136	1904	Moyen	176
137	2005	Moyen	177
138	1870	Moyen	178
139	1765	Moyen	180
140	1823	Moyen	180
141	1846	Moyen	180
142	1851	Moyen	180
143	1860	Moyen	180
144	1897	Moyen	180
145	1901	Moyen	180
146	1972	Moyen	180
147	1909	Moyen	181
148	1733	Moyen	182
149	1849	Moyen	182
150	1899	Moyen	183

N°	Hiver	Type	Surface
151	1915	Moyen	183
152	1967	Moyen	183
153	1984	Moyen	187
154	1977	Moyen	190
155	1978	Moyen	193
156	1958	Moyen	196
157	1886	Moyen	198
158	1778	Moyen	200
159	1948	Moyen	201
160	1994	Moyen	206
161	1776	Moyen	210
162	2006	Moyen	210
163	1968	Moyen	214
164	1857	Moyen	215
165	1946	Moyen	215
166	1739	Moyen	217
167	1723	Moyen	220
168	1728	Moyen	220
169	1732	Moyen	220
170	1802	Moyen	220
171	1811	Moyen	220
172	1736	Moyen	221
173	1766	Moyen	230
174	2003	Moyen	232
175	1834	Moyen	233
176	1908	Moyen	235
177	1781	Moyen	237
178	1752	Moyen	240
179	1777	Moyen	240
180	1812	Moyen	240
181	1960	Moyen	241
182	1746	Moyen	245
183	1783	Moyen	250
184	1827	Moyen	250
185	1806	Moyen	251
186	1892	Moyen	252
187	1982	Moyen	255
188	1792	Moyen	260
189	1821	Moyen	260
190	1922	Moyen	260
191	1980	Moyen	260
192	1996	Moyen	262
193	1969	Moyen	265
194	1818	Moyen	268
195	1954	Moyen	272
196	1731	Moyen	279
197	1787	Moyen	280
198	1808	Moyen	280
199	1847	Moyen	280
200	1924	Moyen	280

N°	Hiver	Type	Surface
201	1729	Moyen	281
202	1775	Moyen	281
203	1828	Moyen	281
204	1895	Moyen	282
205	1738	Moyen	286
206	1780	Moyen	289
207	1774	Moyen	291
208	1748	Sévère	300
209	1782	Sévère	300
210	1813	Sévère	300
211	1816	Sévère	300
212	1855	Sévère	304
213	1853	Sévère	305
214	1745	Sévère	310
215	1861	Sévère	315
216	1749	Sévère	317
217	1768	Sévère	320
218	1788	Sévère	320
219	1804	Sévère	320
220	1810	Sévère	320
221	1767	Sévère	324
222	1979	Sévère	325
223	1889	Sévère	327
224	1831	Sévère	328
225	1755	Sévère	330
226	1771	Sévère	330
227	1795	Sévère	330
228	1839	Sévère	330
229	1850	Sévère	330
230	1900	Sévère	330
231	1916	Sévère	330
232	1923	Sévère	330
233	1862	Sévère	337
234	1883	Sévère	337
235	1986	Sévère	337
236	1875	Sévère	340
237	1772	Sévère	344
238	1963	Sévère	355
239	1985	Sévère	355
240	1726	Sévère	360
241	1758	Sévère	360
242	1770	Sévère	360
243	1785	Sévère	360
244	1865	Sévère	360
245	1902	Sévère	360
246	1840	Sévère	362
247	1820	Sévère	370
248	1970	Sévère	370
249	1941	Sévère	371
250	1966	Sévère	374

N°	Hiver	Type	Surface
251	1841	Sévère	377
252	1751	Extrêmement sévère	380
253	1760	Extrêmement sévère	380
254	1784	Extrêmement sévère	380
255	1786	Extrêmement sévère	380
256	1829	Extrêmement sévère	380
257	1757	Extrêmement sévère	381
258	1926	Extrêmement sévère	382
259	1844	Extrêmement sévère	383
260	1929	Extrêmement sévère	390
261	1836	Extrêmement sévère	395
262	1845	Extrêmement sévère	396
263	1956	Extrêmement sévère	398
264	1747	Extrêmement sévère	400
265	1800	Extrêmement sévère	400
266	1803	Extrêmement sévère	400
267	1805	Extrêmement sévère	400
268	1814	Extrêmement sévère	400
269	1917	Extrêmement sévère	400
270	1987	Extrêmement sévère	405
271	1856	Extrêmement sévère	410
272	1868	Extrêmement sévère	412
273	1876	Extrêmement sévère	412
274	1740	Extrêmement sévère	420
275	1754	Extrêmement sévère	420
276	1789	Extrêmement sévère	420
277	1799	Extrêmement sévère	420
278	1809	Extrêmement sévère	420
279	1830	Extrêmement sévère	420
280	1838	Extrêmement sévère	420
281	1867	Extrêmement sévère	420
282	1871	Extrêmement sévère	420
283	1877	Extrêmement sévère	420
284	1881	Extrêmement sévère	420
285	1888	Extrêmement sévère	420
286	1893	Extrêmement sévère	420
287	1940	Extrêmement sévère	420
288	1942	Extrêmement sévère	420
289	1947	Extrêmement sévère	420

Enquête sur la fréquentation de la banquise

Questionnaire mené auprès des habitants d'Oulu et sa région (Finlande), et de Riga et Jurmala (Lettonie)

1. Gender

- ☐ Female
☐ Male

2. Age

- ☐ <20
☐ 20-29
☐ 30-39
☐ 40-49
☐ 50-59
☐ 60-69
☐ >69

3. Is your work field related to the sea?

- ☐ Yes
☐ No

4. (When the sea is frozen) How often do you go to practice any kind of activities on sea ice during the winter time?

- ☐ Never
☐ Less than once a month
☐ Once - twice a month
☐ Every week-end
☐ More

5. (When the sea is frozen) What kind of activities do you practice on sea ice?

6. Do you think sea ice can represent a danger?

- ☐ Not dangerous at all

- ☐ Low danger
☐ Medium danger
☐ Dangerous
☐ Very dangerous

7. Do you feel well-informed about risks on sea ice when the ice melts?

- ☐ Not at all
☐ Few informed
☐ Moderately informed
☐ Fairly well informed
☐ Very well informed

8. How do you get information about risks on sea ice?

- ☐ Radio
☐ TV
☐ Internet
☐ Newspaper
☐ Friends, colleagues...
☐ Others
☐ None

9. Would you like to be better informed about risks and accidents on sea ice ?

- ☐ Yes
☐ No

10. Have you ever had an incident or accident on sea ice?

- ☐ Yes
☐ No

Annexe 11

Le pouvoir de refroidissement du vent

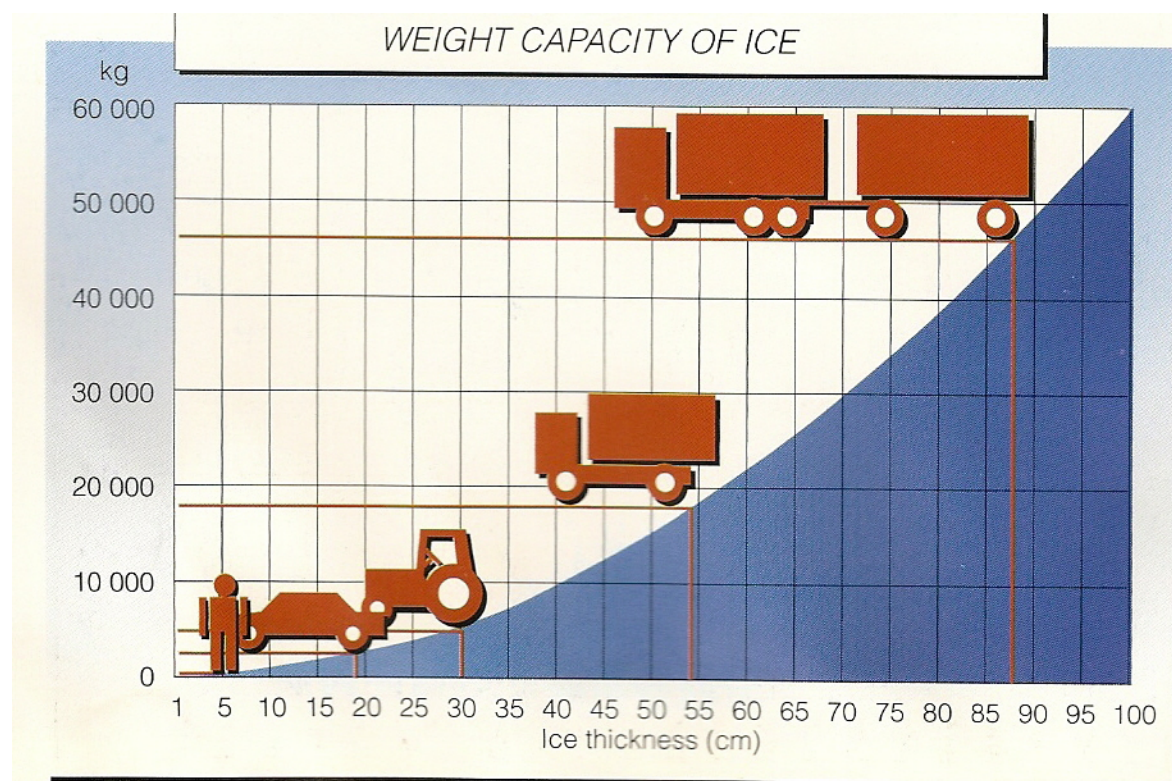
Les valeurs représentent les températures ressenties

Température de l'air (°C) - Vitesse du vent (km/h)	5	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40	-45	-50
5	4	-2	-7	-13	-19	-24	-30	-36	-41	-47	-53	-58
10	3	-3	-9	-15	-21	-27	-33	-39	-45	-51	-57	-63
15	2	-4	-11	-17	-23	-29	-35	-41	-48	-54	-60	-66
20	1	-5	-12	-18	-24	-30	-37	-43	-49	-56	-62	-68
25	1	-6	-12	-19	-25	-32	-38	-44	-51	-57	-64	-70
30	0	-6	-13	-20	-26	-33	-39	-46	-52	-59	-65	-72
35	0	-7	-14	-20	-27	-33	-40	-47	-53	-60	-66	-73
40	-1	-7	-14	-21	-27	-34	-41	-48	-54	-61	-68	-74
45	-1	-8	-15	-21	-28	-35	-42	-48	-55	-62	-69	-75
50	-1	-8	-15	-22	-29	-35	-42	-49	-56	-63	-69	-76
55	-2	-8	-15	-22	-29	-36	-43	-50	-57	-63	-70	-77
60	-2	-9	-16	-23	-30	-36	-43	-50	-57	-64	-71	-78
65	-2	-9	-16	-23	-30	-37	-44	-51	-58	-65	-72	-79
70	-2	-9	-16	-23	-30	-37	-44	-51	-58	-65	-72	-80
75	-3	-10	-17	-24	-31	-38	-45	-52	-59	-66	-73	-80
80	-3	-10	-17	-24	-31	-38	-45	-52	-60	-67	-74	-81

Annexe 12

Capacité de la glace en fonction de son épaisseur

D'après FIMR, 1997, The cool facts about navigation in ice



Annexe 13

Correspondance des classes de navires (« ice class »)

Source : HelCom

Classification society	Ice class				
Finnish - Swedish ice class rules	IA Super	IA	IB	IC	II
Russian Maritime register of shipping (rules 1995)	UL	L1	L2	L3	L4
Russian Maritime register of shipping (rules 1999)	LU5	LU4	LU3	LU2	LU1
American Bureau of shipping	IAA	IA	IB	IC	D0
Bureau Veritas	IA SUPER	IA	IB	IC	ID
CASPPR, 1972	A	B	C	D	E
China classification society	Ice Class B1*	Ice Class B1	Ice Class B2	Ice Class B3	Ice Class B
Det Norske Veritas	ICE-1A*	ICE-1A	ICE-1B	ICE-1C	ICE-C
Germanischer Lloyd	E4	E3	E2	E1	E
Korean register of shipping	ISS	IS1	IS2	IS3	IS4
Lloyd's register of shipping	1AS	1A	1B	1C	1D
Nippon Kaiji Kyokai	IA Super	IA	IB	IC	ID
Registrop Italiano navale	IAS	IA	IB	IC	ID

Annexe 14

D'après Vapalahti Hannu, 1994, Suomen kuvitettu laivaluettelo – Finnish Illustrated List of ships, Vapalahti, Tampere, 272 p.

Le brise-glace *Tuura*

Remorqueur

Propriétaire : Ville d'Oulu

Construit en 1971 par AB Åsiverken, à Åmål, Suède

Volume du navire : 364 BRT (tonneau de jauge brute)

Loa (longueur) : 35,51 m

Bmax (bau) : 9,84 m

Tmax : 5 m

Puissance : 3 x 883 kW

Consommation de carburant : 13 440 L / 24 h

Réservoirs de carburant : 60 m³

Vitesse : 13,5 nœuds

Propulseur d'étrave

Puissance de traction : 294 kN

Équipements contre incendie : pompe : 10 000 L / min + pistolet à eau

Finnish ice class : IA Super

Le brise-glace *Sisu*

Construit en 1976 à Helsinki par Oy Wärtsilä Ab

Déplacement : 9660 t.

Volume du navire : 7094 BRT (tonneau de jauge brute), 367 NRT (tonneau de jauge nette)

Loa (longueur) : 104,70 m

Bmax (bau) : 23,85 m

Tmax : 8,30 m

Puissance : 16 200 kW

Diesel électrique

4 hélices

Consommation de carburant : 101,5 t / 24 h hfo (mazout)

Réservoirs de carburant : 2032 t hfo

Vitesse : 18 nœuds

Puissance de traction : 1900 kN

Navire jumeau : le brise-glace Urho

Le brise-glace *Varma*

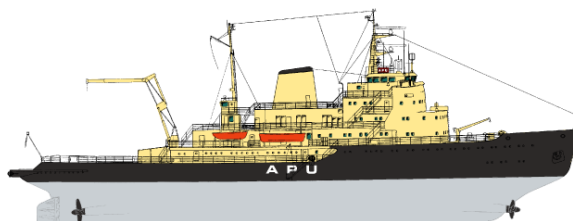
Construit en 1968 à Helsinki par Oy Wärtsilä Ab

Puissance : 8800 kW

Vendu à la Lettonie

Les flottes de déglacage finlandaise et suédoise

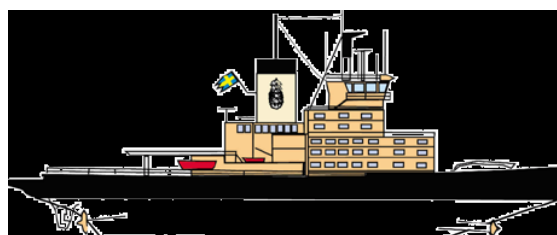
Source : Finnish Maritime Administration and Swedish Maritime Administration



VOIMA 1954 Shaft output 10200 kW (modernised 1979) APU 1970 Shaft output 10400 kW



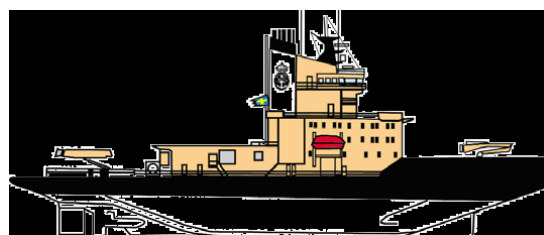
URHO 1975 / SISU 1976 Shaft output 16200 Kw



ATLE, FREJ & YMER 1974-77 Shaft output 16200 kW



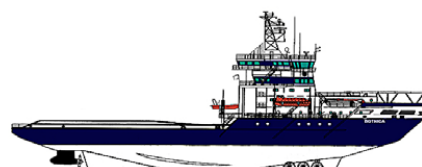
OTSO 1986 / KONTIO 1987 Shaft output 15000 kW



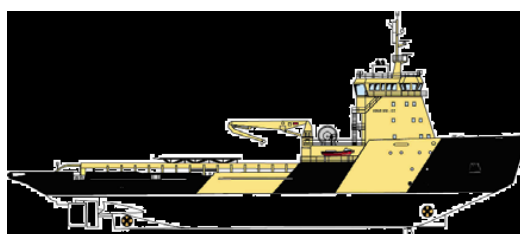
ODEN 1988 Shaft output 18000 kW



FENNICA 1993 / NORDICA 1994 Shaft output 15000 kW

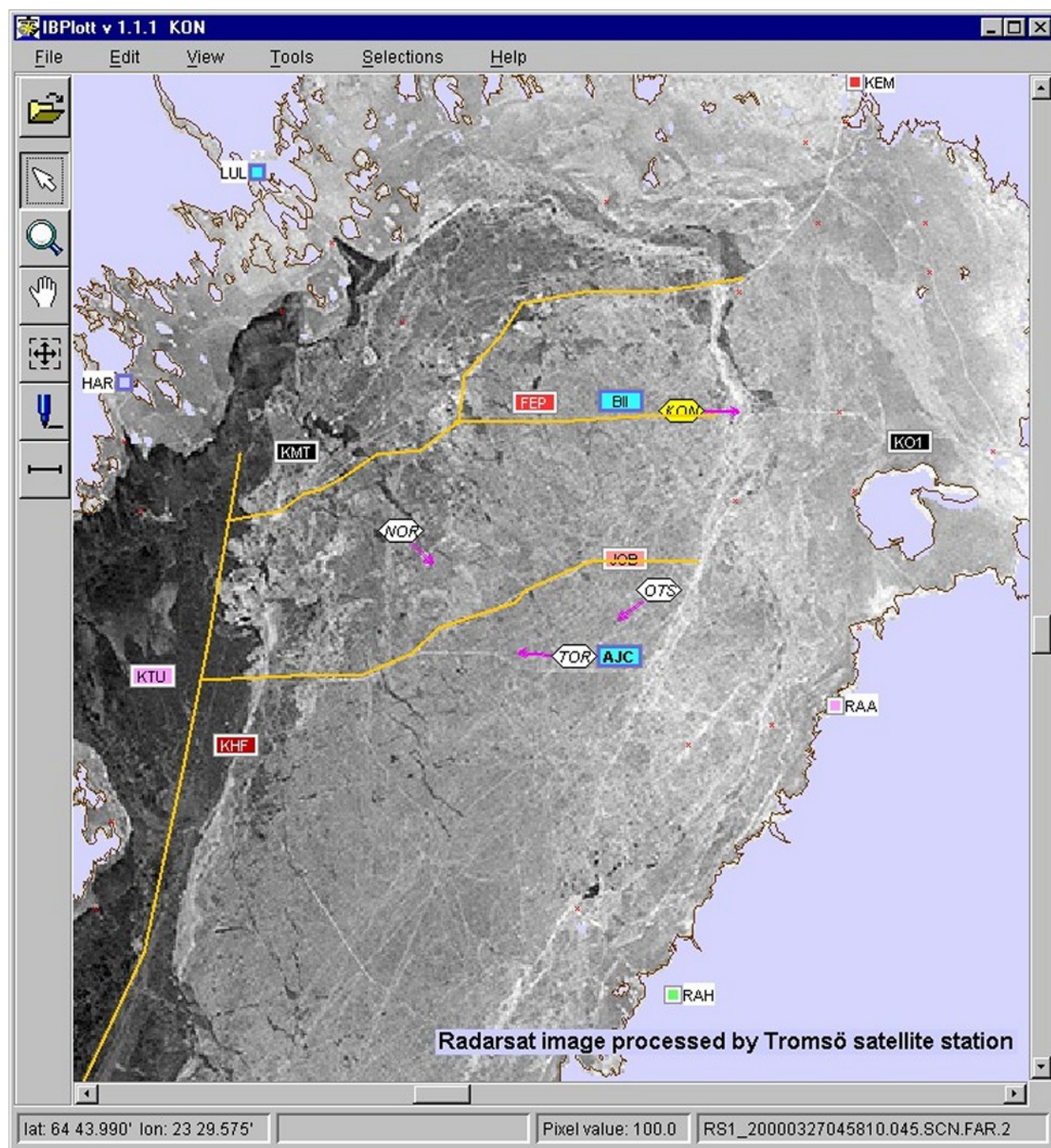


BOTNICA 1998 Shaft output 10 000 kW



TOR VIKING, BALDER VIKING & VIDAR VIKING 2000-01 Shaft output 13500 kW

IBPlott - Situation en Baie de Botnie



Article de journal : « Campement sur la glace sous -22°C »

Tältade på isen i 22 graders kyla

SESKARÖ

Två spanjorer sökte äventyret i norr. På skidor tog de sig från Luleå till Torneå.

– Men det blev för mycket av det goda när de tvingades övernatta i ett litet tält på den frusna Bottenviken i 22 graders kyla, berättar Ingemar Jansson som bjöd in dem på varm gryta, dusch och säng.

Xavier de Viala Gamisau och Pako Sanches Pannadas som bor utanför Barcelona i Spanien ville uppleva snö, kyla, renar och annat exotiskt uppe i norr som de hört talas om.

De packade sina skidor och flög upp till Luleå där de hyrde två rejäla pulkor, tält med mera i en äventyrsaffär. Med hjälp av lånade kartor ställdes sedan färdens mot Torneå.

Men det var kallt, föret trögt och att släpa på pulkorna gick betydligt långsammare än de räknat med.

De tillbringade tre nätter i det hyrda minitältet ute på isen på Bottenviken. Tältet blev blött av kondensfukt och till sist föll det helt enkelt ihop.

Spanjorerna frös ohyggligt.

Under fjärde kvällen när det

**"Där stod två
milt sagt
huttrande
skidåkare"**



De spanska långfärdsskidåkarna klara för avfärd från Seskarö i den soliga men mycket kyliga morgonen. Raili Hokkanen önskar lycka till på färden över isen till Torned.

Foto: Jason

mörknat kom de fram till Seskarö.

Om du får oväntat besök

I ett av husen stod Ingemar Jansson med en nylagad mustig älggryta och väntade på gäster. Och i grannhuset var Raili Hokkanen just redo att gå över på middag.

– Då ringde det på dörren och där stod två milt sagt huttrande skidåkare och frågade om jag kunde visa dem vägen till hotellet, berättar Raili Hokkanen, som erinrade sig en reklamslo-

gan från en kaffefirma: "Om du får oväntat besök".

– Nej hotellet ligger långt bort i Haparanda. "Bed and breakfast" finns inte heller på Seskarö vintertid, förklarade Raili som fann att det enda som återstod var att ta med de totalt nedkylda männen till en värmande brasa, älggryta och värmande rödvin.

Spanjorerna berättade under middagen om sina strapatser och efter att de duschat länge och varmt stupade de i säng.

Nästa morgon visade termometern på minus 24 grader och

Ingemar Jansson avrådde fortsatt skidfärd till Torneå.

Xavier hade dessutom praktiga skavsår, och pjäxorna hade frusit fast på skidorna.

Men efter en rejäl frukost lastade de ändå sina pulkor och drog iväg.

– Vi hörde inget under hela dagen och var riktigt oroliga då himlen blev grön och kylan tilltog fram emot kvällen, berättar Jansson som ringde till Stadshotellet och Vandrarhemmet, där inga spanjorer med pulka synats till.

Välbehållna spanjorer

Men på Stadshotellet i Torneå kunde de meddela att två uttrötade men välbehållna spanjorer kommit in under kvällen. De hade dock gått och lagt sig tidigt.

Enligt planerna skulle de sedan åka buss till Luleå för att därifrån flyga hem till Barcelona.

– Sommartid står Seskarö väl rustad som turistort, men den här lilla incidenten visar att det är sämre ställt vintertid, säger Jansson som hoppas att "några privata hem" skulle kunna ställa upp som värdfolk och ta emot tillfälliga gäster – vilket är vanligt i andra länder.

Eva Spilk/
Ingemar Jansson

Articles de journaux sur des accidents et incidents survenus sur la banquise en Baie de Botnie

Un homme sauvé de la glace
(Pohjolan Sanomat 23.1.98)

Mies pelastettiin jäälautalta

OULU
STT

Sydänkohtauksen saanut mies pelastettiin ajalehtivalta jäälautalta mereltä Pyhäjoen pohjoispuolella tors-
tina. Pelastustoimia häirit-
si kova tuuli.

Pyhäjokinen 44-vuotias mies sai sydänkohtauksen pilkkireissulla Hanhikiven pohjoisrannan tuntumassa Pyhäjoen pohjoispuolella. Mukana ollut kaveri ei saanut miestä maihin, vaan nitron annettuaan lähti hake-
maan apua. Sillä välin jään

reunasta oli irronnut lautta ja kohtauksen saanut mies oli ajalehtinut sen mukana melkoisen matkan merelle päin.

Pyhäjoen palokunnan kaksi palomiestä ja lääkäri yrittivät hakea lautalla olleen miehen soutuveneellä. Jäälautta oli kutistunut enää muutaman metrin suuruiseksi, mutta mies oli vironnut kohtauksestaan. Mies saatiin veneeseen, mutta vene ei päässyt enää maihin. Lopulta Pyhäjoen meripelastusyhdistys sai omalla veneellään haettua soutuveneessä olijat maihin.

Des personnes
secourues sur la
banquise à Pyhäjoki
(Raahelainen 24.1.98)

Pilkkijä pelastettiin jäälautalta Pyhäjoella

Kaksi Pyhäjoen Meripelastusyhdistyksen pelastajaa onnistuivat auttamaan sydänkohtauksen saaneen pilkkijän ja häntä auttamaan menneet kaksi palomiestä ja terveyskeskustalokkari rantaan tors-
tina Pyhäjoella. Palomiehet ja terveyskeskustalokkari olivat aikaisemmin onnistuneet pelastamaan Hanhikiven edustalla ajalehtivalle jäälautalle jääneen pilkkijän soutu-
veneeseen, mutta myrsky-
kemissä puhaltanut tuuli

ja liikkuva jää estivät veneen pääsemisen takaisin rantaan.

Palkalle hälytetty Pyhäjoen Meripelastusyhdistyksen pelastajat hinasivat perämöörillä varustetulla kumiveneellä soutuveneeseen rantaan, mistä sydänkohtauksen saanut pilkkijä kuljetettiin Sepe -pelastushelikopterilla Raahan sairaalaan. Pelastustyöt kestivät kaikkiaan yli neljä tuntia.

Kalastaja pelastettiin jäälautalta

Des pêcheurs
sauvés de la
banquise
(Raahen Seutu
23.1.98)

Pyhäjoen pelastuslaitos, pyhäjokiset meripelastajat ja pelastushelikopteri Sepe joutuivat tekemään tosi-
saan töitä pelastaakseen Hanhikiven edustalla jäälautalle joutuneen ja sairaskohtauksen saaneen kalastajan. Nelisen tuntia kestäneen operaation loppuvaiheessa myös pelastajat joutuivat pelastettaviksi.

Kaksi pyhäjokista miestä oli torstaina päivällä meren-
jäällä kalastamassa, kun toinen heistä sai sairaskohtauksen. Toisen kalastajan hakiessa apua maista kova tuuli hajotti jälkentan ja sairaskohtauksen saanut mies lähti ajalehtimaan jäälautalla.

Pyhäjoen palolaitoksen saapessa paikalle saatettiin todeta, että tilanteeseen ei oltu varauduttu riittävästi. Pyhäjoen palopäällikkö Teuvo Luoto kertoi pelastusryhmän valmistautuneen ensivastotoimintaan eli sairaskohtauksen hoitoon. Se, että hoidettava potilas oli kaukana merellä jäälautalla tuli yllätyksenä niin pelastajille kuin apua hakeneillekin.

Pelastajat lähtivät kuitenkin pelastustöihin rannasta löytyneellä pienellä soutu-
veneellä. Tilanteeseen mukaan tullutta pelastushelikopteri Sepeä ei uskallettu käyttää, koska pelättiin sen aiheuttaman ilmavirran rikkovan jäälautan. Kovassa merenkäynnissä tuulen puhaltaessa pahimmillaan 27 m/s voimalla pelastajat kuin pelastettukin olivat jo hengenvaarassa pienessä veneessään. Lopputuloksiksi avuksi tulleiden Pyhäjoen Meripelastusyhdistyksen jäsenien avustuksella niin potilas kuin pelastajatkin saatiin hinattua turvan kiintojälle. Sairaskohtauksen saaneen miehen pelastushelikopteri kiidatti edelleen saamaan hoitoa.

Rappels, pour la conduite en motoneige, des caractéristiques particulières du "terrain" en mer gelée en hiver (Pohjolan Sanomat 18.1.97)

Moottorikelkkailijan muistettava talvisen merimaaston erityispiirteet

OULU
STT

Jos mieli lähteä keikkailmaan meren päälle, on syytä muistaa talvisen merimaaston erityispiirteet. Tasainen jääkansi on suojasäntäminen ja ulompien liikkuvien tunnistettavien maasto-
kulttuurin välikä, jos olemassa.

Markku Kotonen Oulun merivartiostosta.

Hän muistuttaa, että jätettiin tapahtui tänä talvena varsin epätyypillinen, se jätti myös tavallista ohuempia kohtia jäälle. Ne ovat vieläkin havaittavissa.

Moottorikelkkailijan pitää kiinnittää erityistä huomiota varusteisiin. Tärkeimpiä ovat lämpimin vaatekansi, luuk-
sijajäykkiä, talonkivillä ja polttoput-
tasulampun ja kile-

saava, kompassi, merkinantolaitteet sekä ensiapuvälineet ja hyönteispuimasti.

Jäämakkari tulee olla kaulassa hoidettavien päällä. Mukaan on hyvä ottaa myös työkaluja pieniä korjauksia varten. Niin ikään varusteita, lämpöä, varusteita ja kätönsyysvaru, kannattaa ottaa mukaan. Sama koskee varusteita.

Hyvä on varustautua vielä alustalla toimivalla matkapuhelime-
lla, vara-akulla ja ottaa

mukaan riittävästi muonaa ja juotavaa.

Kerro matkareitit etukäteen

Ennen matkalle lähtöä on ajat-
teltava jollakin suunnit-
telu matkareitti ja arvioitu pa-
laukka. Kotonen muistuttaa.

Myös jättilänteen ja säle-
muutien pitää tunnistua.

Hän huomauttaa, että säle-
toivat muutaa nopeasti. Sata-

min johtavat laavevytyt ovat
käytännössä läpi tulevia, joten väy-
lien sijainnit ja soittamiset rei-
tillä on hyvä selvittää.

Yleensä keikkailijainok-
sista pitää muistaa, että jääpe-
teenen vetäytyä on maassa, Ko-
honen muistuttaa.

Kelkkamattomuksissa van-
hain vuositien vakavasti noin
100 ihmistä ja kymmeniä
määrätyä.

Onnettomuuksien
johtavista tekijöistä ovat suurim-

piä nopeuksien kasvu ja liik-
kejohdon puutteet. Suuravina ovat
suojakypärien ja keltomaiden
puuttaminen.

Kelkkoja ja sen suunnittelu tuo
myös omat vaaransa. Kun reitti
kultee vesiin kanta, riski on-
nettomuuden kasvua. Myös
merkittävimmät esteet ja kiertot
ovat valoköyien aiheuttamia.

Avunpyynti- ja katoamis-
ilmoitukset tehdään yleisen hätä-
numeron, poliisin hätänume-
ron tai merivartiostolle.

Illustrations de la vie sur la banquise au XVIII^{ème} siècle par E. Clarke



Annexe 20

Estimations des modèles couplés océan – glaces de mer sur les conditions glacielles futures de la Baltique en 2100

D'après l'étude menée par Haapala et al. et publiée en 2001 (p.241)

Table 2. Sea-ice statistics of the two 10-year time slice experiments performed with the Helsinki ice model (HIM) and the Rossby Center coupled ice-ocean climate model (RCO). The control simulation represents pre-industrial climate and the scenario simulation future ice conditions around 2100. Minimum, mean and maximum values are tabulated for maximum annual ice extent, maximum annual ice thickness in the center of the Bothnian Bay (65°N 27', 23°E 33') and the mean number of ice days at Kemi (Bothnian Bay, 65°N 39.8', 24°E 31.4') and Kotka (Gulf of Finland, 60°N 27.3', 26°E 57.2').

Control run Variable	min	HIM mean	max	min	RCO mean	max
Ice extent (10 ⁹ m ²)	190	290	420	181	261	419
Ice thickness (cm)	32	49	66	48	71	96
Ice season at Kemi (day)	179	199	223	176	207	232
Ice season at Kotka (day)	144	173	202	144	176	196
Scenario run Variable	min	HIM mean	max	min	RCO mean	max
Ice extent (10 ⁹ m ²)	50	190	270	45	117	217
Ice thickness (cm)	11	27	39	28	43	60
Ice season at Kemi (day)	137	164	183	148	168	190
Ice season at Kotka (day)	87	131	169	60	117	160

Table 2. Sea-ice statistics of observations and of the mean control, A2 and B2 scenario 30-year time slice experiments. Minimum, mean and maximum values are tabulated for annual maximum ice extent, annual maximum ice thickness in the center of the Bay of Bothnia (65°N27', 23°E33'), and the mean number of ice days at Kemi, Kotka, Utö, and Kihnu (see Fig. 1).

Ice extent (10 ⁹ m ²)	min	mean	max
Observations 1961–1990 (2)	52	204	405
Control	100	214	398
Scenario B2	17	87	190
Scenario A2	13	59	163
Ice thickness (cm)	min	mean	max
Control	34	58	92
Scenario B2	0	29	64
Scenario A2	0	23	55
Ice season at Kemi (day)	min	mean	max
Observations 1961–1990 (24)	164	183	208
Control	168	194	226
Scenario B2	122	157	190
Scenario A2	110	146	174
Ice season at Kotka (day)	min	mean	max
Observations 1961–1990 (24)	44	120	208
Control	120	157	192
Scenario B2	12	89	146
Scenario A2	0	64	130
Ice season at Utö (day)	min	mean	max
Observations 1961–1990 (24)	0	43	110
Control	24	90	136
Scenario B2	0	15	82
Scenario A2	0	7	68
Ice season at Kihnu (day)	min	mean	max
Observations 1893–2000 (26)	8	120	174
Control	24	110	168
Scenario B2	0	35	104
Scenario A2	0	18	92

Table 3: Sea ice statistics of the mean control and scenario experiments averaged over the breeding areas in the Bay of Bothnia (BB), Gulf of Finland (GF), Archipelago Sea (AS), and Gulf of Riga (GR), see Figure 8.

Maximum annual mean ice cover (%)	BB	GF	AS	GR
Control	100	100	90	94
Scenario	98	58	24	28
Mean number of ice days	BB	GF	AS	GR
Control	178	131	94	101
Scenario	123	48	18	20
Median date of freezing	BB	GF	AS	GR
Control	Nov 14 th	Dec 16 th	Dec 24 th	Dec 28 th
Scenario	Dec 8 th	Jan 12 th	Jan 8 th	Jan 10 th
Median date of ice break-up	BB	GF	AS	GR
Control	May 14 th	Apr 28 th	Apr 14 th	Apr 16 th
Scenario	Apr 18 th	Apr 2 nd	Mar 22 th	Mar 22 th

d'après l'étude menée par Meier et al. et publiée en 2004 (p. 251 et 254)

Annexe 21

Durées de fonctionnement des brise-glaces dans les eaux finlandaises pour les hivers 2000/01 à 2008/09

Source : FMA / Winter Navigation Department

2000 - 2001

Brise-glaces	Jours	Heures	Assistance (heures)	Part d'assistance	Heures / jours	Extension maximale (km ²)
Botnica	104	1142	583	0,51	11	
Fennica	59	910	502	0,55	15,4	
Kontio	87	1074	715	0,67	12,3	
Otso	95	1342	890	0,66	14,1	
Voima	49	431	253	0,59	8,8	
Apu	13	64	21	0,33	4,9	
Urho	32	445	263	0,59	13,9	
Sisu	17	312	199	0,64	18,4	
Total	456	5720	3426	0,60	12,5	128 000

2001 - 2002

Brise-glaces	Jours	Heures	Assistance (heures)	Part d'assistance	Heures / jours	Extension maximale (km ²)
Otso	175	1962	1225	0,62	11,2	
Kontio	135	1653	1151	0,70	12,2	
Apu	91	396	138	0,35	4,4	
Nordica	82	1094	513	0,47	13,3	
Sisu	89	1416	942	0,67	15,9	
Fennica	34	557	276	0,50	16,4	
Total	606	7078	4245	0,60	11,7	102 000

2002 - 2003

Brise-glaces	Jours	Heures	Assistance (heures)	Part d'assistance	Heures / jours	Extension maximale (km ²)
Kontio	191	2595	1915	0,74	13,6	
Otso	158	2702	1853	0,69	17,1	
Urho	152	2555	1796	0,70	16,8	
Voima	140	1706	1282	0,75	12,2	
Fennica	114	2055	1309	0,64	18	
Botnica	97	1479	676	0,46	15,2	
Apu	123	1858	1158	0,62	15,1	
Sisu	116	1816	1092	0,60	15,7	
Nordica	85	1494	777	0,52	17,6	
Total	1176	18260	11858	0,65	15,5	232 000

2003 - 2004

Brise-glaces	Jours	Heures	Assistance (heures)	Part d'assistance	Heures / jours	Extension maximale (km ²)
Otso	163	2244	1421	0,63	13,77	
Kontio	135	1699	1167	0,69	12,59	
Apu	78	705	337	0,48	9,04	
Botnica	77	607	182	0,30	7,88	
Fennica	89	1090	574	0,53	12,25	
Voima	44	277	149	0,54	6,30	
Nordica	50	370	152	0,41	7,40	
Sisu	74	1135	709	0,62	15,34	
Total	710	8127	4691	0,58	11,45	152 000

2004 - 2005

Brise-glaces	Jours	Heures	Assistance (heures)	Part d'assistance	Heures / jours	Extension maximale (km ²)
Apu	14	82	23	0,28	5,86	
Botnica	33	316	136	0,43	9,58	
Fennica	36	399	192	0,48	11,08	
Kontio	164	1718	1085	0,63	10,48	
Nordica	43	403	195	0,48	9,37	
Otso	92	1234	816	0,66	13,41	
Sisu	50	872	610	0,70	17,44	
Urho	62	838	527	0,63	13,52	
Voima	45	254	108	0,43	5,64	
Total	539	6116	3692	0,60	11,35	177 000

2005 - 2006

Brise-glaces	Jours	Heures	Assistance (heures)	Part d'assistance	Heures / jours	Extension maximale (km ²)
Apu	68	670,7	325,1	0,48	9,86	
Frej	34	516	375	0,73	15,18	
Ymer	22	346,3	225,25	0,65	15,74	
Fennica	41	347,2	161,6	0,47	8,47	
Kontio	112	1342,58	894,32	0,67	11,99	
Vidar Viking	24	347,18	202,75	0,58	14,47	
Otso	154	2007,8	1114,65	0,56	13,04	
Sisu	76	598,6	357,1	0,60	7,88	
Urho	100	1510,69	1049,7	0,69	15,11	
Voima	94	710,2	444,35	0,63	7,56	
Total	725	8397	5150	0,61	11,58	225 000

2006 – 2007

Brise-glaces	Jours	Heures	Assistance (heures)	Part d'assistance	Heures / jours	Extension maximale (km²)
Botnica	33	193	28,6	0,15	5,85	
Fennica	48	636,1	312,4	0,49	13,25	
Frej	76	246	185	0,75	3,24	
Kontio	126	1548,5	967,4	0,62	12,29	
Otso	113	1577,5	998,7	0,63	13,96	
Sisu	89	1339,3	914,7	0,68	15,05	
Urho	34	157,8	75	0,48	4,64	
Voima	30	288,9	120,6	0,42	9,63	
Total	549	5987,1	3602,4	0,60	10,91	139 000

2007 – 2008

Brise-glaces	Jours	Heures	Assistance (heures)	Part d'assistance	Heures / jours	Extension maximale (km²)
Otso	104	825,9	467,6	0,57	7,94	
Kontio	108	606,7	312,6	0,52	5,62	
Fennica	45	143	45,2	0,32	3,18	
Urho	22	196,6	54,7	0,28	8,94	
Ale	4	6,9	2,1	0,30	1,73	
Total	283	1779,1	882,2	0,50	6,29	49 000

2008 – 2009

Brise-glaces	Jours	Heures	Assistance (heures)	Part d'assistance	Heures / jours	Extension maximale (km²)
Otso	139	1534,9	952	0,62	11,04	
Kontio	135	1439,4	930	0,65	10,66	
Sisu	99	1079,2	688,3	0,64	10,90	
Frej	13	260	104	0,40	20	
Urho	62	650	372,7	0,57	10,48	
Voima	44	146,5	65,2	0,45	3,33	
Fennica	30	285,4	10	0,04	9,51	
Total	522	5395,4	3122,2	0,58	10,34	108 000

Cartes des ports d'Oulu et de Riga

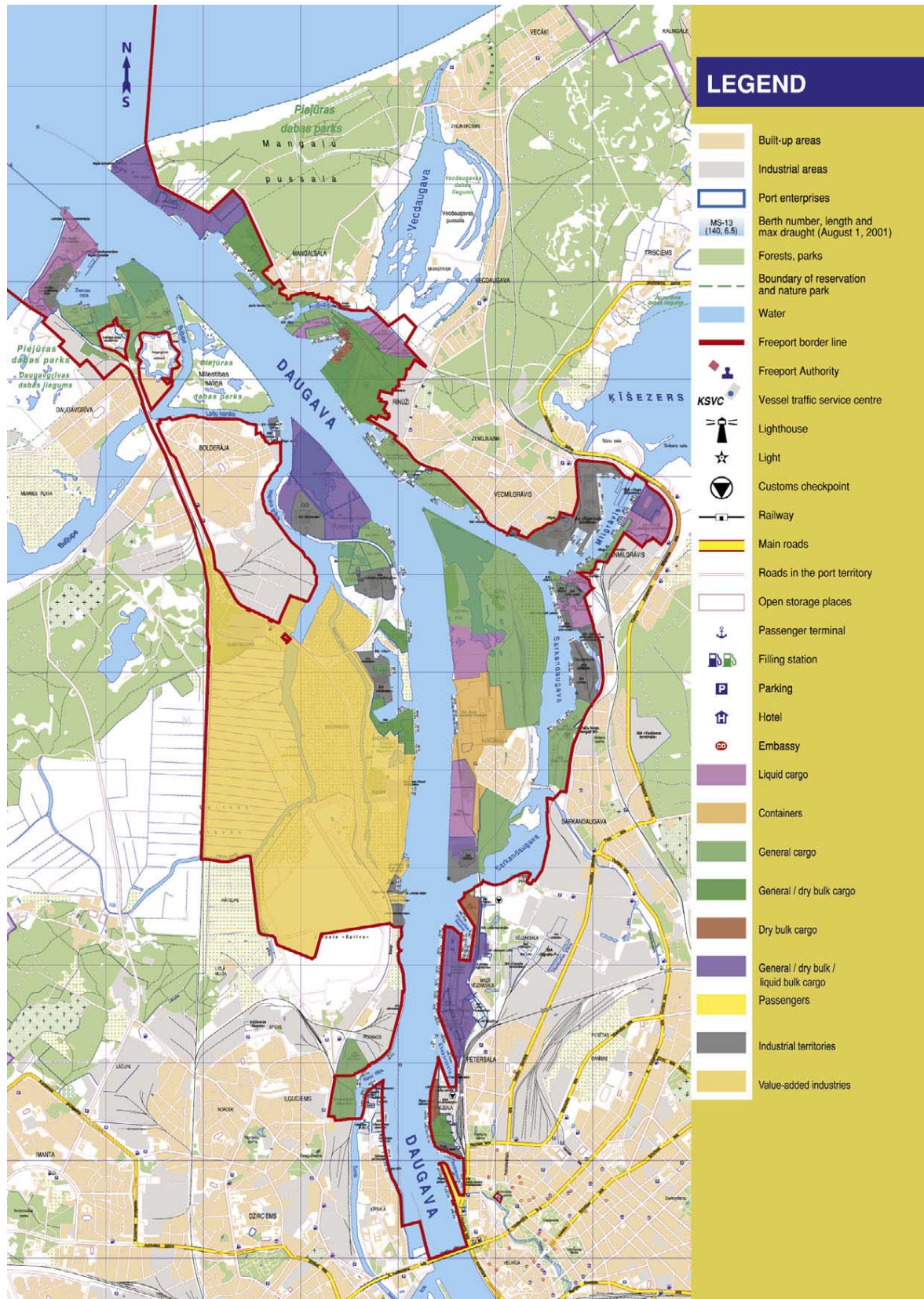
- Le port d'Oulu

D'après Port of Oulu



- Le Port de Riga

D'après Freeport of Riga Authority, 2009, Handbook 2008



Liste des illustrations

Liste des figures

1 – Décalage temporel entre hiver thermique et saison des glaces marines à Oulu.....	12
2 – Carte de la Scandie, reconstituée d’après la Géographie de Ptolémée, 1467.....	23
3 – La <i>Carta Marina</i> d’Olaus Magnus, 1539.....	23
4 – Exemples de cartes sur les conditions glacielles émises par le SMHI et le FIMR.....	31
5 – Les quatre grandes phases de la Mer Baltique à la fin du Weichsélien.....	48
6 – Salinité des eaux marines des Golfes de Finlande et de Botnie.....	63
7 – Variation de la salinité et de la température.....	63
8 – Survol en hélicoptère du Golfe de Riga – 29 Mars 2006.....	102
9 – État de l’englacement de la Mer Baltique en Janvier 2002 et direction des vents dominants.....	153
10 – Direction des vents dominants à Oulu et Kolka pendant les hivers 1985 et 1989.....	160
11 – Températures moyennes (°C) de l’air en surface en hiver et en été dans l’hémisphère Nord (1952-2003).....	173
12 – Relation entre les activités pratiquées sur la banquise et leur fréquence.....	203
13 – Les captures des pêcheurs finlandais professionnels en Baie de Botnie en 2005.....	205
14 – La pêche sur glace professionnelle.....	209
15 – Évolution chronologique des réglementations sur la classification des navires.....	227
16 – Les restrictions maritimes dans le Nord de la Baie de Botnie lors des hivers extrêmement modéré (1988/89), modéré (1998/99), moyen (2002/03), sévère (1978/79), et extrêmement sévère (1986/87).....	228
17 – Définition du risque et les interrogations suscitées.....	252
18 – Relation entre la fréquentation de la banquise et la perception du danger.....	258
19 – Organisation des opérations de recherche et de sauvetage.....	270
20 – Moyens utilisés pour se signaler par les personnes impliquées dans un accident sur la banquise dans le domaine maritime de la garde côtière d’Oulu, du 1 ^{er} novembre au 30 avril de 1990 à 2005.....	271
21 – De l’aléa à la gestion du risque en mer gelée.....	274
22 – Illustration d’un périple sur la glace au XVIII ^{ème} siècle.....	287
23 – Illustration de la traversée dans les glaces de l’entrée du Golfe de Botnie en décembre 1799.....	288
24 – Périodes de réchauffement et de refroidissement selon différents auteurs.....	294
25 – Les importations et exportations au port d’Oulu pour la période 2004 – 2008.....	330
26 – Le brise-glace <i>Krisjanis Valdemars</i>	332
27 – Structure du trafic du port de Riga en 2008.....	333

Liste des tableaux

1 – Les thèses françaises traitant de la Mer Baltique dans les diverses disciplines universitaires.....	26
2 – Caractéristiques des différents bassins de la Mer Baltique (<i>à l’exception des détroits danois</i>).....	43
3 – Superficie des sous-bassins hydrographiques de la Mer Baltique.....	51
4 – Bassin-versants, débits et débits spécifiques des plus importants cours d’eau du bassin	52

hydrographique de la Mer Baltique.....	
5 – Températures et précipitations de stations à latitude similaire.....	55
6 – Le cycle de la glace de mer.....	98
7 – Dates moyennes d’embâcle et de débâcle dans la Baie de Botnie et le Golfe de Riga.....	107
8 – Épaisseurs maximales de glace en Baie de Botnie et dans le Golfe de Riga.....	111
9 – Matrice de corrélation sur la durée du cycle glacial.....	115
10 – Les bassins versants de la Baie de Botnie.....	119
11 – Les plus grands lacs finlandais du bassin hydrographique de la Baie de Botnie.....	119
12 – Données hydrologiques des cours d’eau se déversant dans la Baie de Botnie.....	122
13 – Les débits spécifiques moyens et l’amplitude hydrologique des cours d’eau finlandais	122
14 – Classification des hivers par rapport à l’extension maximale du couvert de glace.....	141
15 – Somme des températures minimales mensuelles et nombre de jours avec des	147
températures minimales négatives pour les hivers 1986/87 et 1992/93 à la station	
d’Oulu.....	
16 – Salinité de la glace de mer dans la Baie de Botnie en 1988, d’après les résultats de	156
Gow et <i>al.</i> , 1992.....	
17 – Quelques caractéristiques glacielles en Mer Baltique et en Baie d’Hudson.....	169
18 – Les types de côtes en Finlande, Suède et Lettonie.....	177
19 – L’érosion des régions d’Övre Norrland, d’Oulu et de la Lettonie.....	180
20 – Fréquentation des ports de la Mer Baltique (nombre de navires) en 2007.....	224
21 – Corrélation entre le nombre de jours de restrictions hivernales et les deux variables :	230
englacement maximal de la Baltique et durée de la saison glacielle.....	
22 – Activités des brise-glace en Baie de Botnie et dans le Golfe de Riga pendant les hivers	237
de 2006, 2007 et 2008.....	
23 – Incidents et accidents dans la Baie de Botnie pendant l’hiver 2002/2003.....	247
24 – Incidents et accidents dans le Golfe de Riga pendant l’hiver 2002/2003.....	247
25 – Récapitulatif des facteurs naturels pouvant produire un risque.....	253
26 – Nombre d’incidents et accidents et de personnes impliquées entre 1990 et 2001 dans	262
le domaine maritime de la garde côtière d’Oulu.....	
27 – Températures mesurées (en degrés Réaumur transcrites en degrés Celsius) à Tornio	283
par les membres de l’expédition scientifique de Maupertuis l’hiver 1736/1737.....	
28 – Températures à Oulu de 1776 à 1799.....	286
29 – Évolution de quelques scénarios pour les glaces de la Mer Baltique.....	318
30 – Le développement de la marine marchande finlandaise de 1920 à 1939.....	323

Liste des graphiques

1 – Extension maximale de la surface englacée en Mer Baltique, et moyenne mobile (sur 10	93
ans) pour la période 1720-2008.....	
2 – Pourcentage de la surface englacée de la Mer Baltique (420 000 km ²) par décennie.....	94
3 – Le cycle glacial en Baie de Botnie et dans le Golfe de Riga.....	109
4 – Évolution et composition de la banquise à Ryöttä, Virpiniemi et Rahja.....	112
5 – Coefficients de croissance de la banquise à Ryöttä, Virpiniemi et Rahja.....	113
6 – Débits de la Tornionjoki et de l’Oulujoki, précipitations et cycle glacial entre 2001 et	121
2005.....	
7 – Nombre de jours entre les prises en glace et les fontes des eaux marines et lacustres	126
entre 1975 et 2005.....	
8 – Dates de la prise en glace et de la fonte des eaux marines et lacustres des bassin-	127
versants de la Tornionjoki, de la Kemijoki et de la Kuivajoki de 1975 à 2004.....	
9 – Dates de la prise en glace et de la fonte des eaux marines et lacustres des bassin-	128
versants de l’Oulujoki, de la Pyhäjoki et de la Lestijoki de 1975 à 2004.....	
10 – Épaisseur du couvert de glace des eaux marines et lacustres de 1995 à 2005.....	129
11 – Anomalies de l’extension maximale de l’englacement de la Mer Baltique et la	136
variation de l’indice de la NAO pendant les mois d’hiver (décembre – mars) de 1900 à	

2008.....	
12 – Écarts à la moyenne de l'extension maximale du couvert de glace de la Mer Baltique et des températures moyennes hivernales (novembre-avril) à la station d'Oulu de 1874 à 2005.....	139
13 – L'intensité du froid à Oulu (somme cumulée des jours-degrés au-dessous de 0°C) et l'extension maximale de la banquise pendant les hivers 1978/79, 1986/87, 1988/89, 1998/99 et 2002/03.....	140
14 – Extension maximale de la surface englacée en fonction des types d'hiver en Mer Baltique pour la période 1720-2008.....	142
15 – Corrélation entre la température moyenne hivernale de l'air (station météorologique d'Oulu) et l'épaisseur maximale de la glace (Virpiniemi) 1959/60 – 2004/05.....	143
16 – Évolution de l'épaisseur de glace à Virpiniemi et des températures minimales journalières cumulées à la station météorologique d'Oulu en 1971/72 et 1979/80.....	145
17 – Corrélation entre la température moyenne hivernale de l'air (station météorologique d'Oulu) et la durée du cycle glacial (Virpiniemi) de 1959/60 à 2004/05.....	146
18 – Évolution de l'épaisseur de glace à Virpiniemi pour les hivers 1986/87 et 1992/93.....	148
19 – Corrélation entre la hauteur de neige sur le couvert de glace et le taux de croissance de la glace pendant l'hiver 2002/03.....	151
20 – Écarts à la normale des températures hivernales (Novembre – Avril) de 1957 à 2004 à Oulu.....	158
21 – Situations glacielles et météorologiques à Oulu en 1985 et 1989.....	159
22 – Transfert de la chaleur de l'eau marine vers l'atmosphère en 1983.....	164
23 – Températures moyennes mensuelles aux stations d'Oulu (Finlande, 65° N) et de Churchill (Manitoba, Canada, 58°44' N) pour la période 1971 – 2000.....	171
24 – Les températures moyennes quotidiennes de novembre 2005 à janvier 2006 à Kuujjuarapik (55° 16' N, Province de Québec) et à Oulu (65° N).....	172
25 – Pyramide des âges pour la région d'Ostrobotnie du Nord en 2000.....	199
26 – Pyramide des âges pour la ville de Riga en 2000.....	199
27 – Répartition de la population d'Ostrobotnie du Nord et de Lettonie par secteur professionnel en 2005.....	199
28 – Fréquentation de la banquise à Oulu et à Riga.....	200
29 – Pourcentage de personnes par activité pratiquée sur la banquise.....	201
30 – Les dates de restrictions hivernales de la classe II à Oulu de 1970 à 2005.....	229
31 – Corrélation entre le nombre d'accidents en mer pendant la saison glacielle dans les eaux finlandaises et l'extension maximale du couvert de glace de 1971 à 2003.....	243
32 – Limite septentrionale (en latitude) des glaces de mer pour atteindre le port d'Oulu et les restrictions à la navigation pendant l'hiver 2002/2003.....	246
33 – Perception du danger en mer gelée des populations d'Oulu et de Riga.....	256
34 – Perception du danger en mer gelée des personnes travaillant en relation avec la mer à Oulu et Riga.....	257
35 – L'information sur les risques encourus en mer gelée.....	260
36 – Pourcentage d'incidents et d'accidents par moyen utilisé entre 1990 et 2001 dans le domaine maritime de la garde côtière d'Oulu.....	262
37 – Les causes des incidents et accidents entre 1990 et 2001 sur la banquise du domaine maritime de la garde côtière d'Oulu.....	263
38 – Moyens d'information sur les risques sur la banquise.....	268
39 – Date d'ouverture du Port de Riga (débâcle) de 1530 à 1958.....	293
40 – Températures moyennes annuelles et différentes courbes de tendance.....	296
41 – Distribution fréquentielle des températures moyennes annuelles par décennie de 1873 à 2005 à Oulu.....	297
42 – Moyenne mobile de 30 ans des températures moyennes saisonnières de 1873 à 2005 à Oulu.....	299
43 – Moyenne mobile de 10 ans des températures moyennes mensuelles de 1873 à 2005 à Oulu.....	299
44 – Moyenne mobile de 30 ans des températures moyennes saisonnières de 1926 à 2005 à	300

Riga.....	
45 – Moyenne mobile de 10 ans des températures moyennes mensuelles de 1926 à 2005 à Riga.....	300
46 – Comportement des glaces de mer à Umeå de 1870 à 2003.....	303
47 – Comportement des glaces de mer à Skellefteå de 1870 à 2003.....	304
48 – Comportement des glaces de mer à Luleå de 1870 à 2003.....	305
49 – Comportement des glaces de mer à Kalix de 1870 à 2003.....	306
50 – Comportement des glaces de mer à Kemi de 1937 à 2005.....	308
51 – Comportement des glaces de mer à Oulu de 1937 à 2005.....	309
52 – Comportement des glaces de mer à Raahede de 1937 à 2005.....	310
53 – Comportement des glaces de mer à Kokkola de 1937 à 2005.....	311
54 – Comportement des glaces de mer à Vaasa de 1937 à 2005.....	312
55 – Durée de la saison glacielle dans le fond du Golfe de Riga de 1888 à 1942.....	314
56 – Dates du dernier navire arrivé et du premier parti du port d'Oulu entre 1925/26 et 1964/65.....	324
57 – La fermeture des ports de Luleå et d'Oulu de 1930 à 1977 et la durée du fonctionnement du brise-glace.....	325
58 – Fonctionnement de la flotte de brise-glaces finlandaise dans les eaux de la Baltique des hivers 2000-2001 à 2008-2009 et extension maximale de la banquise.....	327
59 – Marchandises en tonnes aux ports de Riga et d'Oulu.....	329

Liste des cartes

1 – Localisation de la zone d'étude et état de glaciellisation des eaux polaires et subpolaires dans l'hémisphère Nord le 1 ^{er} mars 2003.....	11
2 – Caractéristiques glacielles moyennes en Mer Baltique au 1 ^{er} mars.....	35
3 – Le relief de la Mer Baltique.....	42
4 – Géologie de la Fennoscandie.....	45
5 – Les formes de relief des côtes de la Baltique.....	46
6 – Le récent rebond glacio-isostasique en Fennoscandie en mm/an et les deux terrains d'étude.....	49
7 – Salinité dans la Mer Baltique.....	51
8 – Bassin hydrographique de la Mer Baltique.....	53
9 – Caractères thermiques et pluviométriques de l'Europe du Nord.....	56
10 – Les masses d'air affectant le climat de la Mer Baltique.....	59
11 – Les régions climatiques de la Mer Baltique selon I. Roussel.....	60
12 – Températures des eaux de surface de la Mer Baltique pendant l'hiver et l'été 2006.....	61
13 – Division juridique des eaux de la Baie de Botnie.....	67
14 – Division juridique des eaux du Golfe de Riga.....	68
15 – Localisation des sites d'observation dans la région d'Oulu.....	71
16 – Localisation des sites d'observation dans la région de Riga.....	72
17 – Des états opposés de l'englacement en Mer Baltique.....	93
18 – Les stades d'englacement en Mer Baltique.....	97
19 – Dates moyennes de prise en glace et de débâcle en Baie de Botnie (1963-1979) et dans le Golfe de Riga.....	107
20 – Le relief et l'hydrologie du bassin-versant de la Baie de Botnie.....	118
21 – Maximum d'englacement en 1985 et 1989.....	157
22 – Quelques états de l'atmosphère pendant les hivers 1985 et 1989.....	161-162
23 – L'englacement de la Baie d'Hudson et de la Mer Baltique le 2 février 2006.....	170
24 – Les masses d'air affectant la Baie d'Hudson et la Mer Baltique et les courants océaniques.....	173
25 – Les types de côtes des littoraux de la Baltique en 2001.....	177
26 – État de l'érosion côtière en Mer Baltique en 2004.....	179

27 – Évolution du trait de côte à Oulu entre 1954 et 1996.....	180
28 – Évolution du trait de côte dans le Golfe de Riga depuis 1940.....	181
29 – Densité de population dans le bassin de la Baltique en 2000.....	196
30 – Localisation du site de pêche de l’hiver 2007.....	210
31 – Les ports de la Mer Baltique en 2007.....	222
32 – Trafic annuel maritime prévu en 2017 en Mer Baltique.....	225
33 – Trajet du brise-glace effectué pour le remorquage du navire <i>KCL Ballerina</i> à Toppila...	235
34 – Position des brise-glaces lors de trois différents hivers, 1987, 1989 et 2003.....	239
35 – Situation glacielle et épaisseur de glace en Mer Baltique le 6 mars 2003.....	245
36 – Distribution spatiale des accidents et incidents par moyen de déplacement sur la banquise du domaine maritime de la garde côtière d’Oulu entre 1990 et 2001.....	266
37 – Localisation des sites mentionnés de l’espace baltique.....	419

Liste des photographies

1 – Banquise côtière, Nallikari, mars 2007.....	36
2 – Banquise consolidée après le passage de la navette brise-glace reliant Oulunsalo à l’île d’Hailuoto, mars 2005.....	36
3 – Banquise lâche, Toppila, 29 mars 2005.....	37
4 – Banquise très lâche, Toppila, 15 avril 2005.....	37
5 – Les sites d’observation finlandais et lettons.....	73
6 – Centre du Golfe de Riga – 29 mars 2006.....	104
7 – Centre du Golfe de Riga (2) – 29 mars 2006.....	104
8 – Côte Sud-Est du Golfe de Riga – 29 mars 2006.....	104
9 – Le phare de Kolka – 29 mars 2006.....	105
10 – Désagrégation de la banquise du Détroit d’Irbe vers la Baltique Propre – 29 mars 2006	105
11 – Les côtes lettones de la Baltique Propre – 29 mars 2006.....	105
12 – La centrale hydroélectrique et le barrage de Merikoski (Oulu) – 22 février 2009.....	124
13 – Pustule développée à l’emplacement d’un bloc d’estran – Marjaniemi, Hailuoto – Mars 2006.....	185
14 – Empilement de glace formant une crête de pression – Jurmala – 26 février 2006.....	185
15 – La glace « hummockée » et poussée vers la côte Mangalu Pussala (Riga) – 18 mars 2006.....	186
16 – Empilement de glace – Hailuoto – 15 mai 2003.....	186
17 – Pied de glace avec ouverture d’une crevasse le séparant de la banquise littorale – Toppila, Oulu – 21 avril 2009.....	189
18 – Fissure à la surface du pied de glace – Nallikari – 28 avril 2009.....	189
19 – Pêcheurs sur glace.....	206
20 – Pêche sur la banquise côtière, Nallikari, Oulu – Mars 2007.....	207
21 – Les différents stades de la pêche sur glace professionnelle.....	210
22 – Kitesurfers sur la banquise.....	213
23 – Skieurs sur la banquise, Nallikari, Oulu – Mars 2007.....	215
24 – Motoneiges sur la banquise côtière, Nallikari, Oulu – 22 février 2009.....	215
25 – Patineurs sur la banquise, Limingantulli, Oulu – 14 mars 2009.....	216
26 – La route sur glace de Hailuoto à Oulunsalo – 22 mars 2008.....	216
27 – Cargo entrant dans le Port de Riga, embouchure de la Daugava – Mangalu Pussala – 18 mars 2006.....	230
28 – Les brise-glaces <i>Tuura</i> et <i>Sisu</i> accostés au quai de Virheäsaari – 8 mars 2007.....	233
29 – Remorquage du cargo <i>KCL Ballerina</i> par le brise-glace <i>Tuura</i> – Port de Toppila, Oulu, 27 février 2005.....	233
30 – Le brise-glace <i>Varma</i> accosté au port de Riga.....	236
31 – Le brise-glace <i>Atle</i> en intervention dans la Baie de Botnie.....	238
32 – Le port d’Oulu (Vihreäsaari) pris en glace pendant l’hiver 2005.....	241
33 – Dommages à l’avant d’un vraquier après collision, Golfe de Finlande.....	248

34 – Individus isolés sur un bloc de glace en dérive.....	265
35 – Motoneige bloquée dans les glaces – Mars 2008.....	265
36 – Aéroglisseur de la station côtière de Virpiniemi portant secours à une motoneige bloquée dans la glace – Mars 2008.....	270
37 – Terminal du port d’Oritkari – Port d’Oulu – 19 avril 2006.....	331
38 – Le port de Riga englacé – Vue d’hélicoptère – 29 mars 2006.....	334

Liste des images satellitaires

1 – La débâcle de la Baie de Botnie, le 4 mai 2003, image Envisat.....	100
2 – Le Golfe de Riga, le 25 mars 2006, image MODIS Aqua.....	103
3 – La poussée d’un vent de Sud-Est sur la banquise du Golfe de Riga, le 5 mars 2003, image Envisat.....	154

Table des matières

Remerciements.....	3
Sommaire.....	7
Introduction générale.....	9

Partie 1

L'ETAT DE LA QUESTION

Chapitre 1	
Position de la thèse	21

1.1 - Aperçu bibliographique sur les travaux antérieurs.....	21
1.1.1 - La découverte de l'Europe du Nord.....	21
1.1.2 - Les travaux antérieurs de la recherche française.....	24
1.2 - Les recherches abordant la question des glaces marines.....	26
1.2.1 - Une recherche alors pluridisciplinaire et internationale.....	26
1.2.2 - Les glaces marines de la Mer Baltique.....	27
1.2.2.1 - L'apport de la recherche finlandaise.....	27
1.2.2.2 - Les Services des glaces de la Mer Baltique.....	29
1.2.2.3 - Les rencontres scientifiques autour de la question des glaces de la Mer Baltique.....	32
1.3 - À propos de la notion de « glacié ».....	33
1.3.1 - L'origine du terme « glacié ».....	33
1.3.2 - La sémantique des glaces flottantes.....	34
1.3.3 - Les contributions scientifiques à la question de l'érosion glacielle.....	38
1.4 - Conclusion.....	39

Chapitre 2	
Présentation de la zone d'étude	41

2.1 - Le cadre géomorphologique et l'évolution géologique de la Mer Baltique.....	41
2.1.1 - Le relief sous-marin de la Mer Baltique.....	41
2.1.2 - L'évolution géologique de la Mer Baltique.....	43
2.2 - Le bassin-versant de la Mer Baltique et son hydrologie.....	49
2.3 - Le climat de la Mer baltique.....	54
2.3.1 - Les principales données climatiques de l'Europe du Nord.....	54
2.3.2 - Le rôle explicatif de la circulation générale de l'atmosphère en Europe du Nord...	57
2.3.3 - Les régions climatiques de la Mer Baltique.....	58
2.4 - Les incidences sur le régime thermique de la Mer baltique.....	61
2.5 - L'originalité de l'espace marin de la Baltique.....	64
2.5.1 - La continentalisation de l'espace marin.....	64

2.5.2 – Définitions de l'espace marin étudié : le littoral et la mer côtière.....	64
2.6 – Conclusion.....	68
 Chapitre 3	
Approche méthodologique.....	69
 3.1 – Le contexte géographique de la recherche.....	69
3.2 – L'approche qualitative.....	74
3.2.1 – L'observation.....	74
3.2.1.1 – L'observation des glaces de mer.....	74
3.2.1.2 – L'observation des sociétés finlandaise et lettone.....	75
3.2.2 – Les entretiens.....	76
3.2.3 – L'analyse des sources bibliographiques.....	76
3.3 – L'approche quantitative.....	77
3.3.1 – Les traitements statistiques de données quantitatives.....	77
3.3.1.1 – Les données climatiques.....	77
3.3.1.1.1 – La station météorologique d'Oulu.....	77
3.3.1.1.2 – La station météorologique de Riga.....	78
3.3.1.2 – Les données statistiques relatives aux conditions de glace.....	79
3.3.1.3 – Les autres sources statistiques.....	80
3.3.2 – Les traitements statistiques de données qualitatives.....	81
3.4 – La représentation spatiale des phénomènes observés.....	81
3.4.1 – Usage de la télédétection en tant qu'outil de spatialisation.....	82
3.4.1.1 – Les images Envisat.....	82
3.4.1.2 – Les images MODIS.....	83
3.4.2 – La représentation cartographique.....	83
3.5 – Limite et critique des sources.....	84
3.5.1 – Les problèmes linguistiques.....	84
3.5.2 – L'accès aux données.....	85
3.6 – Conclusion.....	85

Partie 2

LES GLACES DE MER

 Chapitre 4	
Les caractéristiques glacielles côtières et marines.....	91
 4.1 – L'englacement saisonnier de la Mer Baltique.....	91
4.1.1 – L'extension maximale de la surface englacée de la Mer Baltique.....	92
4.1.2 – Description spatiale des processus de prise en glace et de fonte des eaux marines de la Baltique.....	95
4.1.3 – Le cycle de la glace de mer.....	97

4.2 – Les caractéristiques glacio-marines des eaux des Golfes de Botnie et de Riga et leur variabilité spatio-temporelle.....	106
4.2.1 – Les dates moyennes de prise en glace et de fonte dans les Golfes de Botnie et de Riga.....	106
4.2.2 – Le cycle glaciaire.....	108
4.2.3 – L'épaisseur de glace en Baie de Botnie et dans le Golfe de Riga.....	110
4.2.3.1 – L'épaisseur maximale de la banquise.....	110
4.2.3.2 – L'évolution de l'épaisseur de la banquise.....	111
4.2.4 – La variabilité spatio-temporelle des conditions glacielles.....	114
4.2.5 – Conclusion partielle.....	115
4.3 – Les apports des eaux continentales.....	116
4.3.1 – Le bassin hydrographique de la Baie de Botnie.....	116
4.3.2 – L'exploitation des ressources hydrologiques.....	120
4.3.3 – Les régimes hydrologiques.....	120
4.3.4 – Les conditions glacielles fluviales et lacustres dans le Nord de la Finlande.....	124
4.4 – Conclusion.....	131

Chapitre 5

La relation des phénomènes glacio-marins avec le climat et la météorologie **133**

5.1 – Quelques rappels des conditions climatiques hivernales en Mer Baltique.....	133
5.2 – L'influence des forçages atmosphériques et thermiques sur l'englacement des espaces marins de la Mer Baltique.....	134
5.2.1 – L'oscillation Nord-Atlantique (NAO).....	135
5.2.2 – Le rôle fondamental de la température.....	137
5.2.2.1 – L'englacement de la Mer Baltique et la température de l'air.....	137
5.2.2.1.1 – La relation température de l'air / extension des glaces marines.....	137
5.2.2.1.2 – L'intensité de l'hiver.....	139
5.2.2.1.3 – La sévérité de la prise en glace, indicateur de la sévérité de l'hiver.....	141
5.2.2.2 – Corrélation entre la température et l'épaisseur de glace.....	143
5.2.2.3 – Corrélation entre la température et la durée du cycle glaciaire.....	145
5.2.2.4 – Conclusion partielle.....	148
5.2.3 – Le rôle isolant de la neige.....	148
5.2.4 – Les facteurs météomarin.....	151
5.2.4.1 – L'effet du vent et des courants marins sur la banquise.....	151
5.2.4.2 – La salinité dans la glace de mer.....	155
5.2.5 – Particularités des hivers sévères ou extrêmement modérés : le cas des hivers 1985 et 1989.....	157
5.2.6 – Conclusion partielle.....	163
5.3 – La banquise, comme élément majeur du système climatique de la Mer Baltique...	163
5.3.1 – Influence des glaces de mer sur le climat.....	163
5.3.2 – Le rôle des ouvertures dans la couche glaciaire.....	165
5.3.3 – L'inertie des conditions d'englacement.....	166
5.4 – L'originalité du cas de la Mer Baltique : l'intérêt d'une comparaison avec la Baie d'Hudson.....	167
5.4.1 – Deux domaines marins géomorphologiquement semblables.....	168
5.4.2 – Les conditions glacielles divergentes de la Baie d'Hudson et de la Mer Baltique....	168
5.4.3 – Les facteurs climatiques et atmosphériques.....	170
5.5 – Conclusion : la particularité de la Mer Baltique.....	173

Chapitre 6**L'action des glaces de mer sur la morphologie littorale 175**

6.1 – L'érosion littorale en Mer Baltique.....	175
6.1.1 – Les types de côte.....	175
6.1.2 – L'évolution actuelle des littoraux de la Mer Baltique.....	178
6.2 – La part de l'action des glaces de mer dans l'érosion littorale en Mer Baltique.....	182
6.2.1 – L'ambivalente activité des glaces de mer : protection et/ou érosion.....	183
6.2.2 – L'action des glaces de mer sur les littoraux de la Baltique.....	183
6.2.2.1 – Les déformations glacielles côtières de la Baie de Botnie et du Golfe de Riga.....	184
6.2.2.2 – La formation du pied de glace sur le littoral d'Oulu.....	188
6.2.2.3 – Le rôle morpho-sédimentaire des glaces de la Mer Baltique.....	190
6.3 – Conclusion	190

Partie 3**LES IMPLICATIONS SOCIETALES****Chapitre 7****Les populations riveraines face à la banquise hivernale 195**

7.1 – Caractéristiques des populations côtières finlandaises et lettones : les exemples d'Oulu et Riga.....	196
7.1.1 – Oulu, le technopôle nord finlandais.....	196
7.1.2 – Riga, la capitale lettone où domine la présence russe.....	197
7.2 – L'attractivité saisonnière de la banquise.....	198
7.3 – Les formes d'adaptation sociétale à la banquise.....	204
7.3.1 – Hivernalisation des activités pratiquées en mer libre de glace.....	204
7.3.1.1 – La pêche en mer.....	204
7.3.1.1.1 – La pêche sur glace.....	206
7.3.1.1.2 – L'aquaculture côtière.....	211
7.3.1.2 – Le kitesurf sur glace.....	212
7.3.2 – Un espace marin « continentalisé ».....	213
7.3.3 – Des conditions hivernales qui favorisent certaines pratiques ancestrales : le cas de la chasse aux phoques.....	217
7.4 – Conclusion : attractivité de la banquise pour les uns, répulsion pour les autres....	219

Chapitre 8**La navigation hivernale et la banquise 221**

8.1 – Classification des navires et restrictions au trafic hivernal.....	225
8.2 – Les aides à la navigation.....	231
8.2.1 – Le fonctionnement des brise-glaces.....	231
8.2.1.1 – Le cas des brise-glaces Tuura et Sisü, caractéristique dans le fond du Golfe de Botnie.....	232
8.2.1.2 – Le cas du brise-glace Varma dans le Golfe de Riga.....	235

8.2.1.3 - L'assistance par les brise-glaces en quelques chiffres.....	236
8.2.2 - Des infrastructures portuaires adaptées aux conditions glacielles.....	239
8.2.3 - Les technologies nouvelles d'information au service de la navigation hivernale.....	241
8.3 - Les mauvaises « fortunes de mer ».....	242
8.3.1 - L'exemple de l'hiver 2002/2003.....	244
8.3.1.1 - Description de l'hiver 2002/2003.....	244
8.3.1.2 - Les incidents et les accidents dans la Baie de Botnie et le Golfe de Riga durant cet hiver.....	245
8.3.1.2.1 - Les causes des événements.....	246
8.3.1.2.2 - Les dommages subis (tableaux 23 et 24).....	246
8.3.2 - Solutions pour limiter les risques.....	248
8.4 - Influence de la navigation sur le couvert de glace.....	248

Chapitre 9

La banquise, un risque sociétal ? 251

9.1 - Aléas et vulnérabilité.....	252
9.2 - La perception du danger.....	254
9.2.1 - La banquise, un espace dangereux ?.....	255
9.2.2 - Les facteurs.....	256
9.2.2.1 - Les caractéristiques individuelles.....	256
9.2.2.1.1 - Le milieu professionnel.....	256
9.2.2.1.2 - L'expérience « vécue » de la banquise.....	257
9.2.2.2 - Les caractéristiques sociétales.....	259
9.2.3 - Conclusion partielle.....	260
9.3 - Les incidents et accidents en mer gelée.....	261
9.4 - La gestion du risque et de l'accident.....	267
9.4.1 - La prévention du risque.....	267
9.4.2 - L'intervention et la gestion en cas d'incident ou d'accident.....	269
9.4.2.1 - L'appel au secours.....	271
9.4.2.2 - La recherche et le sauvetage.....	272
9.5 - Conclusion.....	273

Partie 4

TENDANCES ET PERSPECTIVES

Chapitre 10

Passé et avenir des glaces de mer de la Baltique 279

10.1 Historicité des conditions glacielles.....	279
10.1.1 - Les glaces de mer au cœur de nombreux récits de voyageurs.....	280
10.1.2 - La reconstitution historique des conditions glacielles en Mer Baltique.....	289
10.1.2.1 - Le climat en Europe depuis la dernière grande déglaciation : une alternance de réchauffements et de refroidissements relatifs.....	289
10.1.2.2 - Les glaces de mer de la Baltique face aux variations du climat.....	290
10.1.2.2.1 - D'après les travaux récents.....	290

10.1.2.2.2 – D’après le date d’ouverture du port de Riga.....	292
10.1.2.3 – Synthèse.....	293
10.2 – L’analyse régionale fine : le cas de la Baie de Botnie et du fond du Golfe de Riga.....	295
10.2.1 – L’évolution des températures aux stations d’Oulu et de Riga.....	295
10.2.2 – L’évolution des glaces de mer dans la Baie de Botnie et dans le fond du Golfe de Riga.....	301
10.2.2.1 – La côte suédoise de la Baie de Botnie.....	301
10.2.2.2 – La côte finlandaise de la Baie de Botnie.....	307
10.2.2.3 – Les oppositions littorales en Baie de Botnie.....	313
10.2.2.4 – La côte lettone du Golfe de Riga.....	313
10.2.3 – Conclusion partielle.....	315
10.3 – Le futur des conditions glacielles de la Mer Baltique.....	316
10.3.1 – Le changement climatique.....	316
10.3.2 – La banquise.....	317
10.4 – Conclusion.....	318
 Chapitre 11	
Les impacts socio-économiques des variations glacielles	319
 11.1 – Les transformations probables des activités traditionnelles.....	319
11.1.1 – Les modifications pour la pêche « blanche ».....	319
11.1.2 – Les modifications pour le chasse aux phoques.....	320
11.2 – L’évolution de la navigation maritime.....	321
11.2.1 – L’historique de la navigation hivernale.....	321
11.2.1.1 – Les débuts de la navigation hivernale dans la Baltique.....	321
11.2.1.2 – De l’entre-deux-guerres à la fin des années 1960 : le renforcement des navires et les premières réglementations.....	322
11.2.2 – La navigation désormais possible dans les glaces de mer depuis 1970.....	325
11.2.3 – Et si la banquise se réduisait	326
11.3 – Vers un nouvel espace économique ?.....	328
11.3.1 – Les ports d’Oulu et de Riga : analyse comparée de l’économie portuaire.....	329
11.3.1.1 – Le Port d’Oulu.....	330
11.3.1.2 – Le Port de Riga.....	331
11.3.2 – La Baltique, comme espace géostratégique ancien.....	334
11.3.3 – « La Dimension Septentrionale » : vers une nouvelle « Hanse » étendue à toute la Baltique ?	336
11.3.3.1 – Les coopérations régionales.....	336
11.3.3.2 – La question très actuelle de la sécurité maritime.....	337
11.4 – Conclusion.....	338
 Conclusion générale.....	341
 Références bibliographiques.....	345
Références des séries de données et des sites internet.....	363
Glossaire.....	369
Annexes.....	371

Liste des illustrations.....	405
Liste des figures.....	405
Liste des tableaux.....	405
Liste des graphiques.....	406
Liste des cartes.....	408
Liste des photographies.....	409
Liste des images satellitaires.....	410
Table des matières.....	411

Carte 37 - Localisation des sites mentionnés de l'espace baltique
 Map 37 - Location of mentioned sites in the baltic area



Réalisé par Élise Lépy

Les glaces de mer en Mer Baltique. Étude géographique et implications environnementales et sociétales à partir de l'étude comparée de la Baie de Botnie (Oulu, Finlande) et du Golfe de Riga (Lettonie)

La thèse se propose d'étudier le phénomène de prise en glace saisonnière sur les littoraux et les espaces marins proches des Golfs de Botnie et de Riga (Mer Baltique), et l'impact de ces glaces marines hivernales sur leurs milieux physiques et humains. La problématique s'interroge donc sur les processus climato-maritimes responsables de l'embâcle et de la débâcle des glaces saisonnières et sur leurs conséquences environnementales, économiques et sociétales. L'intérêt de cette recherche réside en l'analyse comparative qu'elle engendre du fait de sa démarche à la fois environnementale et sociétale, à la charnière des questions de Nature et Sociétés propres à l'analyse géographique. L'étude des littoraux du fond de la Mer Baltique se concentre alors sur deux régions distinctes : celles d'Oulu en Finlande et de Riga en Lettonie. La comparaison de ces deux domaines politiquement, économiquement et culturellement différents est riche d'enseignement pour comprendre la diversité des réactions et des adaptations à la gestion de la contrainte naturelle imposée par ces phénomènes glaciels. Il s'agit donc, dans ce travail, d'analyser les caractéristiques glacielles de la Mer Baltique d'une part, et la diversité des formes d'occupation humaine et de l'adaptation des sociétés à ces phénomènes d'autre part. Enfin, il s'agit de s'interroger sur les incidences socio-économiques de la variabilité historique des conditions glacielles ainsi que celles du réchauffement climatique contemporain sur les activités traditionnelles et actuelles hivernales et sur la navigation maritime.

Mots-clés (indexation Rameau) : *Glace de mer – Baltique (mer) ; Glace de mer – Botnie, Golfe de ; Glace de mer – Riga, Golfe de ; Glace de mer – Aspect social – Botnie, Golfe de ; Glace de mer – Aspect social – Riga, Golfe de ; Transports maritimes – Baltique (mer)*

Mots-clés (indexation libre) : *Mer Baltique, Baie de Botnie, Golfe de Riga, littoral, mer côtière, glaces marines, processus climato-maritimes, activités hivernales, transports maritimes*

Sea ice in the Baltic Sea. Geographical study and environmental and societal implications from the comparative study of the Bay of Bothnia (Oulu, Finland) and the Gulf of Riga (Latvia)

The study deals with the seasonal ice growth and melting phenomena on littorals and marine areas in the Gulfs of Bothnia and Riga (Baltic Sea), and the sea ice impact on their physical and human environments. The purpose is to understand climatic and marine processes of ice formation and break-up of littoral waters and coastal sea, and on their environmental, economical and societal consequences. The interest of this research lies in the comparative analysis it generates through both environmental and societal approaches, close to the geographical issues of Nature and Societies. The study of the Baltic Sea littorals is based on two distinct areas : the regions of Oulu in Finland and Riga in Latvia. The comparison of those two regions politically, economically and culturally different is interesting to understand the diversity of reactions and adaptations to the human management of this natural constraint imposed by those sea ice phenomena. It is therefore, in this work, to analyse the characteristics of Baltic Sea ice and to discuss about the diversity of the forms of human occupation and adaptation of societies of these phenomena. Finally, are emphasized the socio-economic implications of the historical variability of sea ice conditions and those of the contemporary climate warming on traditional and current winter activities and maritime shipping.

Keywords (Rameau indexing) : *Sea ice – Baltic (sea) ; Sea ice – Bothnia, Gulf of ; Sea ice – Riga, Gulf of ; Sea ice – Social aspects – Bothnia, Gulf of ; Social aspects – Riga, Gulf of ; Shipping – Baltic (sea)*

Keywords (free indexing) : *Baltic Sea, Bay of Bothnia, Gulf of Riga, littoral, coastal sea, sea ice, climatic and marine processes, winter activities, maritime shipping*

Spécialité : Géographie physique, humaine, économique et régionale



Laboratoire GEOPHEN
UMR LETG 6554 CNRS
Université de Caen/Basse-Normandie
Esplanade de la Paix
BP 5186
14032 Caen Cedex (France)
eliselepy@yahoo.fr